

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE CONVECTIVO DE
TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE ESCALDADO DE *Rubus
glaucus Benth* (MORA CASTILLA) UTILIZANDO COMSOL MULTIPHYSICS.**

YOMAR DANOVIS AVILÉZ MONTES

MARÍA ALEJANDRA ROMERO MARTÍNEZ

Responsables

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

BERÁSTEGUI-CÓRDOBA

2015

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE CONVECTIVO DE
TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE ESCALDADO DE *Rubus
glaucus Benth* (MORA CASTILLA) UTILIZANDO COMSOL MULTIPHYSICS.**

YOMAR DANOVIS AVILÉZ MONTES

MARÍA ALEJANDRA ROMERO MARTÍNEZ

Responsables

Trabajo de grado para optar por el Título de Ingeniero de Alimentos

EMIRO LÓPEZ ACOSTA. I.A., M.Sc.

Director.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS

BERÁSTEGUI-CÓRDOBA

2015

RESPONSABILIDAD DEL AUTOR

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
trabajo será solo del autor**

**(Artículo 61, Acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002, del Consejo Superior
de la Universidad de Córdoba)**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Berástegui, 2015

DEDICATORIA

A Dios padre misericordioso y a su bondad, por la vida, la sabiduría, el amor y sobre todo por la paz que me ha traído y todas las enseñanzas diarias; por ser mi amigo fiel y por las bendiciones que en ti he recibido. TE AMO DIOS.

A mis padres, María Montes y Anival Avilez, por el amor infinito que me brindan, por ser mi fortaleza y por el apoyo incondicional. Son la luz de mi existir y el motor de mi vida; la Gloria de Dios sea para ustedes.

A mis hermanos, Joham, Saura y Emma, por la unión entre nosotros, la amistad y por todas esas sonrisas que en mi alma han sembrado. Hermanitos sus triunfos también son mis triunfos...

A mi sobrino Damian y Maria Victoria, son esperanza en mi vida.

A mi tía hermosa, la que siempre me ha dado ánimo, por sus consejos y por creer en mí. Tía LLillo el sueño que me ayudaste a construir hoy es realidad.

A mi compañera de tesis, Alejandra, por ser más que amiga una hermana, por la paciencia, amistad, por el apoyo emocional y académico. Dios te deparara grandes éxitos en tu vida, te lo mereces...

A todos mis amigos de la U y de la pensión, por las alegrías y momentos especiales que hemos compartidos. En especial Johann, Cristian, Leider, Alvaro y el Puri. Gracias de todo corazón...

A mi novia M. J, por ser ejemplo de mujer, por la confianza, la comprensión y amor en todo este tiempo. Y por enseñarme que la familia no depende del tipo de consanguinidad. Dios está contigo.

A la familia, Anaya Bedoya, por acogerme como un hijo más en su humilde hogar. La justicia y el amor se besaron y derramaron amor de Dios en todos ustedes.

A nuestros directores de tesis, Emiro López y Fabian Ortega, por siempre estar disponibles para nosotros, por su atención y dedicación... GRACIAS!

Y a todas aquellas personas que creyeron en mí... Seré un servidor para ustedes.

Yomar Danovis Aviléz Montes.

DEDICATORIA

A Dios padre por permitirme vivir todos y cada uno de los momentos de mi vida, por formar de mí lo que hoy día soy, todo ha sido por tu santísima voluntad. Padre, gracias por tu amor infinito, por tu protección, por tus millones de bendiciones y porque has sido mi luz y mi guía.

A mis padres Mario Romero y Merys Martínez, por ser mis pilares, mi mayor bendición, por brindarme su amor y comprensión... Gracias por nunca dejarme caer, y siempre enseñarme y recordarme que debo luchar por mis sueños... Padres aquí está el reflejo de su sacrificio, no fue en vano todo su esfuerzo. Me llena de orgullo ser su hija... Dios no me pudo mandar mejores padres. Los amo.!

A mis hermanos, María del Mar y Mario Javier, por ser mis motores, porque siempre he hecho las cosas para darles lo mejor de mí y ser un buen ejemplo... Gracias por su cariño incondicional... A mi hermanita menor, que aunque no lleva mi sangre en mi corazón tiene un lugar muy especial, Chirry esto también es por ti, por cumplirte a ti... A mi compañero, amigo, alcahueta en todo... Yomar, gracias, mil gracias por compartir conmigo tantos momentos, por nunca dejarme desfallecer, por comprender mi carácter.

Sabes, esto no es una despedida, porque cuando las amistades son sinceras, jamás se salen del corazón... En tu vida deseo miles de Éxitos.

A mi novio, por estar siempre a mi lado, porque a pesar de las adversidades siempre pude contar contigo. Hoy recuerdo las palabras que al comenzar me dijiste: Lo importante es que creas en lo que vas a ser! Gracias por creer en mí... Te amo!

A mis familiares por sus consejos, apoyo y cariño... A ustedes que creyeron en mí, mil gracias.

A mis amigos de la U, por su lealtad, amistad y cariño... A ustedes que son parte fundamental en mi vida... Los quiero.

A mis pelaitas Majo y Cindy por soportar la distancia, los largos ratos sin vernos, por sus mensajes en días de traspas, pero a pesar de todo eso, aquí seguimos más unidas que siempre.

A nuestros directores de tesis, Emiro López y Fabian Ortega, por brindarnos su conocimiento, por regalarnos su tiempo y por creer en nosotros... Infinitas gracias a ustedes.

María Alejandra Romero Martínez.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Padre por su inmenso amor y por brindarnos su compañía en todo momento, porque sin él nada de esto sería posible. La gloria sea para ti.

A nuestra Alma Máter, Universidad de Córdoba, de manera especial, al programa de Ingeniería de Alimentos por instruirnos en este arduo camino, por alcanzar nuestra gran meta.

A nuestros docentes, por su orientación, dedicación y entrega infinita para formar en nosotros un profesional integral. Al personal de laboratorio, en especial al profesor Germán Durango, por su disponibilidad y apoyo, y al profesor Elkin Vergara por su oportuna colaboración.

A nuestros directores, Emiro López y Fabián Ortega, por su atención, su compromiso, entrega y ante todo por regalarnos la certeza de que si se puede... Y si se pudo!

A la Sra. Lidis por su incondicional confianza, su gestión y por su ardua labor solidaria.

A nuestros familiares por su leal apoyo.

A nuestros amigos, que siempre confiaron en nosotros, que creyeron en nuestras cualidades... Gracias por compartir tan buenos momentos!

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN -----	xxiii
ABSTRACT -----	xxv
1. INTRODUCCIÓN -----	26
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA -----	28
2.1. Mora de Castilla (<i>Rubus glaucus Benth</i>) -----	28
2.1.1. Generalidades de la mora de castilla (<i>Rubus glaucus Benth</i>) ---	28
2.1.2. Propiedades del fruto -----	28
2.1.3. Composición nutricional -----	29
2.2. Escaldado -----	29
2.2.1. Definición de escaldado -----	29
2.2.2. Objetivos del escaldado -----	30
2.2.3. Tiempos de escaldado -----	30
2.2.4. Transferencia de calor en el proceso de escaldado -----	31
2.2.4.1. Ecuación de transferencia de calor por conducción en estado transitorio -----	31
2.2.4.2. Ecuación general de transferencia de calor por convección -----	32
2.2.4.3. Condiciones de frontera -----	32
2.2.4.4. Coeficiente convectivo de transferencia de calor -----	33
2.2.4.5. Aplicación del coeficiente convectivo dentro de la industria de alimentos -----	34
2.2.5. Propiedades termofísicas de los alimentos -----	34
2.2.5.1. Conductividad térmica (K) -----	34

2.2.5.2.	Densidad (ρ)-----	35
2.2.5.3.	Calor específico (C_p) -----	35
2.2.5.4.	Difusividad térmica -----	35
2.3.	Modelización matemática -----	36
2.4.	Simulación de procesos -----	36
2.5.	Predicción de perfiles de temperatura por el método de elementos finitos ‘‘MEF’’ -----	37
2.6.	COMSOL: Simulación multifísica mediante elementos finitos	37
2.7	Antecedentes -----	38
3.	MATERIALES Y MÉTODOS -----	42
3.1.	Materiales -----	42
3.1.1.	Materia Prima -----	42
3.1.2.	Equipo de escaldado -----	42
3.1.3.	Medición de temperaturas -----	42
3.1.4.	Medición de las dimensiones -----	42
3.2.	Diseño Metodológico -----	43
3.2.1.	Muestras -----	43
3.2.2.	Fase experimental -----	43
3.2.3.	Modelos de la transferencia de calor -----	44
3.3.	Simulación del proceso de escaldado -----	44
3.3.1.	Modelación geométrica -----	44
3.3.2.	Configuración física -----	46
3.3.3.	Ajustes de contorno -----	47
3.3.4.	Generación de la malla -----	47
3.3.5.	Cálculo de la solución -----	47
3.3.6.	Postprocesado y visualización -----	48
3.4.	Validación del modelo -----	49
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	50
4.1.	Medidas de las dimensiones de la mora -----	50
4.2.	Coefficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto -----	50

4.2.1.	Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto para la temperatura de 70°C -----	50
4.2.1.1.	Muestra 1 -----	50
4.2.1.2.	Muestra 2 -----	52
4.2.1.3.	Muestra 3 -----	53
4.2.1.4.	Muestra 4 -----	54
4.2.2.	Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto para la temperatura de 80°C -----	55
4.2.2.1.	Muestra 1 -----	55
4.2.2.2.	Muestra 2 -----	56
4.2.2.3.	Muestra 3 -----	57
4.2.2.4.	Muestra 4 -----	58
4.2.3.	Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto para la temperatura de 90°C. -----	59
4.2.3.1.	Muestra 1 -----	59
4.2.3.2.	Muestra 2 -----	60
4.2.3.3.	Muestra 3 -----	61
4.2.3.4.	Muestra 4 -----	61
4.3.	Temperatura de escaldado Vs. Coeficiente convectivo de transferencia de calor. -----	62
4.4.	Validación del modelo -----	65
5.	CONCLUSIONES -----	69
6.	RECOMENDACIONES -----	70
7.	BIBLIOGRAFÍA -----	71
8.	ANEXOS -----	78

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Información nutricional de 100 g de pulpa de <i>Rubus</i> <i>glaucus Benth</i> -----	29
Tabla 2. Propiedades termofísicas de la mora a las diferentes temperaturas de escaldado. -----	46
Tabla 3. Porcentaje de error medio relativo absoluto correspondiente a cada muestra y temperatura de escaldado -----	63
Tabla 4. Prueba de múltiples rangos -----	64
Tabla 5. Mediciones de las moras para la temperatura de 70°C -----	81
Tabla 6. Mediciones de las moras para la temperatura de 80°C -----	81
Tabla 7. Mediciones de las moras para la temperatura de 90°C -----	82
Tabla 8. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 1 -----	87
Tabla 9. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 2 -----	88
Tabla 10. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 3 -----	89

Tabla 11.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 4 -----	90
Tabla 12.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 1 -----	91
Tabla 13.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 2 -----	92
Tabla 14.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 3 -----	93
Tabla 15.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 4 -----	94
Tabla 16.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 1-----	95
Tabla 17.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 2 -----	96
Tabla 18.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 3 -----	97
Tabla 19.	Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 4 -----	98

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 1. Temperatura de 70°C. -----	51
Gráfico 2. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 2. Temperatura de 70°C. -----	52
Gráfico 3. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 3. Temperatura de 70°C. -----	53
Gráfico 4. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 4. Temperatura de 70°C. -----	54
Gráfico 5. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 1. Temperatura de 80°C. -----	55
Gráfico 6. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 2. Temperatura de 80°C. -----	56
Gráfico 7. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 3. Temperatura de 80°C. -----	57
Gráfico 8. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 4. Temperatura de 80°C. -----	58

Gráfico 9.	Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 1. Temperatura de 90°C. -----	59
Gráfico 10.	Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 2. Temperatura de 90°C. -----	60
Gráfico 11.	Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 3. Temperatura de 90°C. -----	61
Gráfico 12.	Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 4. Temperatura de 90°C. -----	62
Gráfico 13.	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso de escaldado de mora a 70 °C -----	66
Gráfico 14.	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso de escaldado de mora a 80 °C -----	66
Gráfico 15.	Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso de escaldado de mora a 90 °C -----	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mediciones tomadas a las moras -----	42
Figura 2. Triángulo- rectángulo para obtener la coordenada Y en 4 -	45
Figura 3. Estructura del centro térmico de la mora -----	48
Figura 4. Materia prima utilizada -----	78
Figura 5. Inmersión de la muestra en la freidora-escaldadora -----	78
Figura 6. Montaje de escaldado de moras -----	79
Figura 7. Ingreso de las coordenadas x, y para el largo L de la mora -	79
Figura 8. Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 1 de la mora -----	79
Figura 9. Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 3 de la mora -----	80
Figura 10. Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 4 de la mora -----	80
Figura 11. Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 5 de la mora -----	80

Figura 12.	Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 6 de la mora -----	81
Figura 13.	Mitad del corte transversal de la mora -----	82
Figura 14.	Sólido forzado -----	83
Figura 15.	Configuración geométrica de la mora en 3D -----	83
Figura 16.	Ingreso de las propiedades termofísicas de la mora -----	83
Figura 17.	Ingreso de temperatura inicial o en el tiempo 0 de la mora-	84
Figura 18.	Ingreso del “h” supuesto y la temperatura de escaldado--	84
Figura 19.	Mallado de la configuración geométrica en 3D de la mora-	84
Figura 20.	Ingreso de las condiciones de tiempo -----	85
Figura 21.	Calentamiento simulado de la mora -----	85
Figura 22.	Ingreso de los datos del centro térmico de la mora -----	86
Figura 23.	Perfil de temperatura para un ‘h’ supuesto y una temperatura determinada. -----	86
Figura 24.	Distribución de residuales para la muestra 1 a 70°C. -----	87
Figura 25.	Distribución de residuales para la muestra 2 a 70°C. -----	89
Figura 26.	Distribución de residuales para la muestra 3 a 70°C. -----	90
Figura 27.	Distribución de residuales para la muestra 4 a 70°C -----	91
Figura 28.	Distribución de residuales para la muestra 1 a 80°C. -----	92
Figura 29.	Distribución de residuales para la muestra 2 a 80°C. -----	93
Figura 30.	Distribución de residuales para la muestra 3 a 80°C. -----	94
Figura 31.	Distribución de residuales para la muestra 4 a 80°C. -----	95
Figura 32.	Distribución de residuales para la muestra 1 a 90°C.-----	96

Figura 33.	Distribución de residuales para la muestra 2 a 90°C. -----	97
Figura 34.	Distribución de residuales para la muestra 3 a 90°C.-----	98
Figura 35.	Distribución de residuales para la muestra 4 a 90°C. -----	99

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Mora de castilla seleccionada para la realización del proyecto --	78
Anexo B. Escaldado de mora de castilla. -----	78
Anexo C. Montaje utilizado para la obtención de los datos. -----	79
Anexo D. Ingreso de las coordenadas x, y para cada una de las dimensiones de la mora. -----	79
Anexo E. Mediciones de las moras utilizadas para cada análisis a las diferentes temperaturas. -----	81
Anexo F. Estructura geométrica en dos dimensiones de la mora. -----	82
Anexo G. Generación del solido forzado de la mora en 2D.-----	83
Anexo H. Formación del sólido y geométrica de la mora en 3D -----	83
Anexo I. Digitación de las propiedades termofísicas de la mora.-----	83

Anexo J.	Digitación de la temperatura inicial o tiempo cero.-----	84
Anexo K.	Simulación con un h supuesto a condiciones de escaldado -----	84
Anexo L.	Generación de la malla para la mora en 3D. -----	84
Anexo M.	Digitación de las condiciones de contorno (tiempo del escaldado).-----	85
Anexo N.	Simulación del proceso de calentamiento de la mora.-----	85
Anexo O.	Digitación del centro térmico de la mora.-----	86
Anexo P.	Perfil de temperatura simulado para un h supuesto a condiciones específicas-----	86
Anexo Q.	Datos de % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 1.-	87
Anexo R.	Gráfico que expone los residuales para la muestra 1 a 70°C	87
Anexo S.	Datos de % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 2.-	88
Anexo T.	Gráfico que expone los residuales para la muestra 2 a 70°C	89
Anexo U.	Datos de % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 3.-	89
Anexo V.	Gráfico que expone los residuales para la muestra 3 a 70°C	90
Anexo W.	Datos de % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 4.-	90
Anexo X.	Gráfico que expone los residuales para la muestra 4 a 70°C	91

Anexo Y	Datos de % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 1.-	91
Anexo Z	Gráfico que expone los residuales para la muestra 1 a 80°C	92
Anexo AA	Datos de % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 2.-	92
Anexo AB	Gráfico que expone los residuales para la muestra 2 a 80°C	93
Anexo AC	Datos de % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 3.-	93
Anexo AD	Gráfico que expone los residuales para la muestra 3 a 80°C	94
Anexo AE	Datos de % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 4.-	94
Anexo AF	Gráfico que expone los residuales para la muestra 4 a 80°C	95
Anexo AG	Datos de % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 1 -	95
Anexo AH	Gráfico que expone los residuales para la muestra 1 a 90°C	96
Anexo AI	Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 2-	96
Anexo AJ	Gráfico que expone los residuales para la muestra 2 a 90°C	97
Anexo AK	Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 3-	97
Anexo AL	Gráfico que expone los residuales para la muestra 3 a 90°C.	98
Anexo AM	Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 4-	98
Anexo AN	Gráfico que expone los residuales para la muestra 4 a 90°C	99

RESUMEN

La transferencia de energía en forma de calor es una de las operaciones más importantes que tiene lugar en la industria de alimentos. El escaldado es uno de los procesos que se realiza en la gran mayoría de los alimentos, es por ello, que resulta importante conocer cómo se lleva a cabo la transferencia de calor en los alimentos, para así obtener procesos efectivos, seguros y controlados. En la industria de alimentos, generalmente se trata de optimizar los procesos térmicos, siendo lo mencionado anteriormente la razón por la cual se aplican modelos computacionales que simulen la fenomenología física del proceso, en este caso, la transferencia de calor por convección en geometrías irregulares complejas como la mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*). El desarrollo de la presente investigación permitió determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor h , del proceso de escaldado de mora de castilla teniendo como fluido de calefacción el agua, a temperaturas de 70°C, 80°C y 90°C. Para la simulación de dicho escaldado se utilizó el software COMSOLTM Multiphysics 3.5 versión evaluación, se llevó a cabo la medición de la historia térmica interna de moras de castilla, usando termopares tipo K referencia NI USB- TC01 fabricados por National Instruments. Se procedió a estimar un valor inicial para h , el cual fue sometido a simulación del pretratamiento.

El procedimiento se repitió para cada muestra a cada temperatura respectiva, hasta conseguir el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor, el cual representa el menor error medio relativo absoluto en cada muestra, encontrándose dichos errores entre 0.396% - 3.746%, estando por debajo del criterio de aceptación adoptado (5%). Los valores de h para 70°C, 80°C y 90°C fueron 504.5 W/m² *K, 382.5 W/m² *K y 567 W/m²*K respectivamente.

Palabras claves: Escaldado, coeficiente convectivo de transferencia de calor, mora, simulación.

ABSTRACT

The transfer of energy as heat is one of the most important operations taking place in the food industry. Blanching is one process that is performed in most foods, is therefore that it is important to know how to carry out heat transfer in food, to obtain effective processes, safe and controlled. In the food industry, it usually tries to optimize thermal processes, with the above the reason why computer models that simulate the physical phenomenology of process applied, In this case, the convective heat transfer in complex and irregular geometries raspberry of Castilla (*Rubus glaucus* Benth). The development of this investigation established the convective heat transfer coefficient h , the blanching process of raspberry of Castilla taking as fluid heating the water, at temperatures of 70 ° C, 80 ° C and 90 ° C. The evaluation COMSOLTM Multiphysics version 3.5 software was used for the simulation of the scalding, was conducted measuring the internal thermal history of raspberry of Castilla, using type K thermocouples reference NI USB-TC01 manufactured by National Instruments. He proceeded to estimate an initial value for h , which underwent pretreatment simulation. The procedure was repeated for each sample at each respective temperature, until the value of the convective heat transfer coefficient, which represents the smallest mean absolute relative error in each sample, finding these errors between 0.396% - 3.746%, still below acceptance criteria adopted (5%). The values of h to 70 ° C, 80 ° C and 90 ° C were 504.5 W / m² * K, 382.5 W / m² * K and 567 W / m² * K respectively.

Keywords: *Blanching, convective heat transfer coefficient, raspberry, simulation.*

1. INTRODUCCIÓN

La mora de castilla es una fruta originaria de la zona andina tropical alta de América. Pertenece a la familia de las *rosáceas*, junto con otra gran variedad de especies. Esta fruta es la más cultivada en Colombia por su adaptabilidad y características especiales (Mazo *et al.*, 1998). A ésta se le han atribuido muchos beneficios para la salud, por el alto contenido de antioxidantes que posee, que son de gran importancia en el cuidado de la salud de las personas. Estas propiedades benéficas la han estudiado ampliamente autores como (Seeram, 2006; Szajdek y Borowska, 2008; Rennie, 2009).

Para la obtención de cada uno de los productos industriales a partir de la mora, es necesario el empleo de tratamientos térmicos que garanticen una buena calidad del producto, como lo es el escaldado. Actualmente, en la industria agroalimentaria no se tiene en cuenta la relación tiempo-temperatura óptima, además del desconocimiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor, que garantice los costos más bajos en los diseños de los equipos para la realización del proceso, es por ello, que es indispensable el estudio de dicho coeficiente.

Para predecir la transferencia de calor fluido-partícula, la determinación del coeficiente convectivo es uno de los factores claves (Astrom y Bark, 1994). Éste, resulta indispensable para el cálculo de la cinética de calentamiento o enfriamiento de alimentos, ya que controla la razón de intercambio de calor entre el medio y el producto (Ordoñez y

Morales, 1996). La determinación del coeficiente convectivo es importante para varios estudios sobre los procesos de transferencia de calor, ya que es un parámetro necesario en el diseño y control de los equipos de procesamiento de alimentos (Sablani, 2009). Es por ello, la importancia del estudio de la aplicación de modelos computacionales para simular el fenómeno de transferencia de calor en el proceso de escaldado de mora, para la determinación de este parámetro.

El presente estudio tiene como alcance la determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en el escaldado de la mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*) con el fin de diseñar y controlar dicho proceso, para ello se realizará la simulación del proceso en COMSOLTM Multiphysics 3.5 versión evaluación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*)

2.1.1 Generalidades de la mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*)

El origen de la mora de castilla comprende las zonas tropicales altas de América lo que se ve reflejado en cultivos ubicados en los países de Ecuador, Colombia, Panamá, Salvador, Honduras, Guatemala, México y Estados Unidos (Franco y Giraldo, 1998).

El fruto es esférico o elipsoidal de tamaño variable, 2 a 4 cm de longitud, con un diámetro promedio de 20 mm; de color verde cuando se están formando, cuando está maduro el color varía entre púrpura claro y oscuro, y están dispuestos en racimos largos. Está compuesto por la unión de pequeños frutos esféricos en forma de racimo llamados drupillas unidas a un receptáculo, el peso del fruto va de 3,0 a 5,0 gramos, es de consistencia dura y sabor agridulce cuando la madurez es incompleta y dulce cuando alcanza la madurez (Antia y Torres, 1998).

2.1.2. Propiedades del fruto

La mora es una fruta muy nutritiva que contiene un 80% de agua, 10% de carbohidratos (Correa, 2002). La gran mayoría de la producción de mora está destinada a la obtención

de productos procesados como por ejemplo mermeladas, yogur, pulpas, vinos, etc. (Castro y Cerdas, 2005).

Las moras son frutos de bajo valor calórico por su escaso aporte en hidratos de carbono; sin embargo lo que en realidad las caracteriza es la presencia de abundantes pigmentos naturales (antocianos y carotenoides), de acción antioxidante (Villaroel, 2010)

2.1.3. Composición nutricional

En la Tabla 1 se observa la composición nutricional para 100g de parte comestible de mora de castilla según el ICBF.

Tabla 1. Información nutricional de 100 g de pulpa de *Rubus glaucus Benth*

Componente	Cantidad
Calorías	63Kcal
Agua	83.7 g
Proteína	1.0 g
Grasa	0.10 g
Carbohidratos	14.6 g
Fibra	5.3 g
Cenizas	0.6 g
Calcio	42.0 mg
Fosforo	10.0 mg
Hierro	1.7 mg
Vitamina C	8.0 mg
Niacina	0,3 mg

Fuente: Tabla de Composición de Alimentos Colombianos. ICBF.

2.2 Escaldado

2.2.1 Definición de escaldado

Es un proceso que consiste en elevar la temperatura de la materia prima, exponiéndola a un medio calórico húmedo (generalmente entre 70°C - 100°C), manteniendo dicha

temperatura por un tiempo determinado y enfriando el producto rápidamente a una temperatura cercana a la ambiental. (Fellows, 1988).

2.2.2 Objetivos del escaldado.

El escaldado permite diferentes objetivos, los cuales son:

- Limpiar el producto (Ress y Bettison, 1993).
- Inhibir las reacciones enzimáticas indeseables (Barret y Theerakulrait, 1995).
- Expulsar los gases (aire) ocluidos en los espacios intercelulares de las hortalizas (Ganthavorn y Powers, 1988) evitando, por lo tanto, el aumento de la presión desarrollada en las conservas durante el procesamiento debido a la expansión de los gases presentes (Barret y Theerakulrait, 1995), es decir se previene la reducción del vacío (Luh y Kean, 1988).
- Mejorar el sabor (Hersom y Hulland, 1984) y estabilizar el color verde de los vegetales por activación de las clorofilas en sus respectivos clorofílicos (Fennema, 1993).
- Reducir la carga microbiana viable, ya sean células vegetativas, levaduras y hongos (Barret y Theerakulrait, 1995).
- Incrementar la textura en algunas verduras (Fennema, 1993).
- Disminuir del tiempo de cocimiento del producto final (Poulsen, 1986).

2.2.3 Tiempos de escaldado.

El tiempo de escaldado representa el tiempo de residencia del producto en el escaldador y éste depende de los siguientes parámetros: Temperatura del baño de escaldado, coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), temperatura inicial y final del

producto, tamaño y geometría del producto, propiedades termofísicas del producto, tales como, calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica y densidad, método de calentamiento (baño de inmersión, fluido pasando a través del producto o viceversa) (Geankoplis, 1986).

2.2.4 Transferencia de calor en el proceso de escaldado.

El escaldado e hidrogenfriado, involucran dos de los tres mecanismos de transferencia de calor conocidos; estos son la convección y la conducción. El mecanismo de radiación no se presenta en estos casos ya que éste es relevante sólo cuando la transferencia de calor se manifiesta a través del espacio o de los gases, y no a través de los fluidos utilizados en los procesos en estudio, como el agua o el vapor (Geankoplis, 1986).

2.2.4.1. Ecuación de transferencia de calor por conducción en estado transitorio

La ley básica que da relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura, es atribuida al físico francés Joseph Fourier quien desarrolló esta ley basándose en observaciones experimentales (Geankoplis, 1986).

La ecuación de difusión o de Fourier, en coordenadas cartesianas en dirección del eje x, es expresada como se observa en la Ecuación (1).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde el signo negativo indica que el flujo de calor es en dirección de caída de temperatura, con el fin de satisfacer la segunda ley de la termodinámica.

A: área (m²); K: Conductividad térmica (W/m K)

2.2.4.2. Ecuación general de transferencia de calor por convección

Cuando el fluido, gas o líquido que rodea la superficie del sólido tiene movimiento convectivo, natural o forzado, la velocidad de transferencia de calor del sólido al fluido (o viceversa), se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton (Bird *et al.*, 1960). Ver Ecuación (2).

$$q = hA * (T_s - T_m) \quad (2)$$

Dónde:

h: Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m² K); A: área (m²); T_s: temperatura superficial (°C o K); T_m: temperatura del medio fluido (°C o K).

2.2.4.3. Condiciones de frontera

Los modelos para describir la transferencia de calor conductivo a través de la capa, se basan en la forma tridimensional de la Ley de Fourier en un medio isótropo (Ecuación 3) con condiciones de contorno convectivos (Ecuación 4) y considerando una distribución uniforme de temperatura en el punto, en el inicio experiencias (Ecuación 5). Los modelos se resuelven mediante el software COMSOL Multiphysics™ 3.5 versión evaluación. El cual funciona utilizando la metodología de elementos finitos (Torres y Grau, 2007).

$$\text{Centro térmico} \quad \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (3)$$

$$\text{Condición de frontera:} \quad \nabla(k \nabla T) = h(T_\infty - T) \quad (4)$$

$$\text{Condición inicial:} \quad T(x, y, z, t = 0) = T_0 \quad (5)$$

Donde:

ρ : Densidad de la mora; C_p : Calor específico de la mora; k : Conductividad térmica; T_∞ : Temperatura de escaldado; T : Temperatura centro térmico; t :Tiempo; T_0 : Temperatura Inicial de la muestra.

2.2.4.4. Coeficiente convectivo de transferencia de calor

Es el factor proporcional que representa la resistencia a la transferencia de calor, entre el fluido de calentamiento o enfriamiento y la superficie de un producto inmerso en él. En los tratamientos térmicos como el escaldado, este coeficiente “ h ” es uno de los parámetros más importantes a conocer para el cálculo de la cinética de calentamiento de alimentos, ya que controla la razón de intercambio de calor entre el medio y el producto. En consecuencia, es necesario determinarlo y conocerlo para satisfacer la ecuación que rige el proceso de convección (Ordoñez, 1996). El coeficiente convectivo de transferencia de calor no es una propiedad del fluido, es un parámetro que se determina experimentalmente, y cuyos valores dependen de todas las variables que influyen en la convección; como son la geometría del sistema, las características del flujo de fluido y sólido, las temperaturas de ambos, el área de transferencia y las propiedades termofísicas del sistema (Sablani, 2009).

La determinación de h entre líquidos y cuerpos con geometría irregular puede hacerse mediante la aplicación tanto de metodologías de optimización como de modelos matemáticos de transferencia de calor (Pinho y Cristianini, 2006). Esta determinación de h puede llevarse a cabo por medio de un problema de transferencia de calor inversa, es decir, por la medida de la historia térmica interna de un cuerpo específico y la resolución de ecuaciones de transferencia de calor (Olsson *et al.*, 2008).

2.2.4.5 Aplicaciones del coeficiente convectivo dentro de la industria de alimentos.

En lo que respecta a las aplicaciones dentro de la industria de alimentos, el coeficiente convectivo de transferencia de calor, es un parámetro necesario en el diseño y control de los equipos de procesamiento de alimentos, donde fluidos como aire, nitrógeno, vapor, aceite, etc. son usados como medio de calentamiento, enfriamiento, congelación o cocción. En dichos procesos la transferencia de calor puede ir acompañada de una transferencia de masa, por lo que la determinación del valor del coeficiente convectivo se complica, convirtiéndose en un objeto de investigación importante en la transferencia de calor convectiva (Sablani, 2009).

2.2.5. Propiedades termofísicas de los alimentos.

Las propiedades termofísicas son dependientes de la temperatura y del alimento en estudio, lo que provoca un efecto directo en la velocidad de penetración de calor dentro de él. Por lo anterior para lograr un estudio exitoso de la transferencia de calor en estado transitorio, su identificación y magnitud serán muy importantes así como la forma en la cual se expresan. Choi y Okos (1986) desarrollaron correlaciones matemáticas para calcular las propiedades termofísicas a partir de la composición proximal y temperatura.

2.2.5.1 Conductividad térmica (K)

Es una medida de la habilidad de un material para conducir el calor suministrado. En alimentos la conductividad térmica depende principalmente de la composición, pero también de algunos otros factores que afectan el camino del flujo de calor a través del

material, tales como, porcentajes de espacios vacíos, homogeneidad, forma y tamaño de los alimentos (Sweat, 1985).

2.2.5.2. Densidad (ρ)

Es definida como la masa de un material por unidad de volumen (Giancoli, 2006). En la mayoría de los casos la densidad del alimento decrece con el aumento de la temperatura (Lewis, 1990).

2.2.5.3. Calor específico (C_p)

El calor específico indica la cantidad de calor requerido para cambiar la temperatura de un material. A diferencia de la conductividad térmica, el calor específico es independiente de la densidad de masa, por lo tanto, conociéndose el calor específico de cada componente de una mezcla, es suficiente para predecir el calor específico de toda la mezcla (Sweat, 1985).

2.2.5.4. Difusividad térmica.

La difusividad térmica relaciona la capacidad de un material para conducir calor y su habilidad para almacenarlo. (Sweat, 1985). El conocimiento de la difusividad térmica de los alimentos es importante para diseñar y optimizar los procesos en los que la transferencia de calor está implicada (Baucour *et al.*, 2003).

2.3 Modelización matemática.

Las construcciones abstractas conocidas como modelos son solo aproximaciones de la realidad (debido a la complejidad de los fenómenos involucrados) y se expresan por medio de sistemas de ecuaciones y construcciones lógico-matemáticas que constituyen las diferentes leyes y teorías (Scenna, 1999). Los modelos matemáticos son resultado de una metodología que involucra, como niveles previos, el estudio del modelo físico y el modelo conceptual (Estrada, 1998; Estrada et al., 2003).

La utilización de la modelación matemática de la transferencia de calor en la evaluación de los procesos térmicos, ha sido una poderosa herramienta cuando se debe garantizar la seguridad, las cualidades nutricionales y sensoriales de los alimentos. (Pornchaloempong *et al.*, 2003a; Martins, 2006). Lo que permite que las pruebas de ensayo y error empleadas en el desarrollo y pruebas tecnologías en la industria sean minimizadas, ya que estas representan, por lo tanto, altos costos y la demanda de formación de personal. (Martins, 2006).

2.4 Simulación de procesos.

La simulación se define como una técnica para evaluar en forma rápida un proceso con base en una representación del mismo, mediante modelos matemáticos. La solución de éstos se lleva a cabo por medio de programas de computadora y permite tener un mejor conocimiento del comportamiento del proceso, (Martínez, 2000).

2.5. Predicción de perfiles de temperatura por el método de elementos finitos “MEF”

La metodología de resolución por el método de elementos finitos es una alternativa eficiente para resolver problemas con modelos muy cercanos a lo real y para tal fin la simulación numérica resulta ser una valiosa herramienta, la cual permite determinar la distribución y evolución de las temperaturas en el producto, minimizando los procedimientos experimentales, reduciendo los costos y tiempos de desarrollo. Los elementos finitos son utilizados para aproximar las ecuaciones diferenciales de gobierno de un sistema continuo convirtiéndolo en un sistema discreto (Martins, 2006).

2.6. COMSOL: simulación multifísica mediante elementos finitos

La herramienta COMSOL Multiphysics está destinada a la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE) utilizando el método de los elementos finitos. En el entorno de trabajo de COMSOL el usuario dispone de las herramientas necesarias para la introducción de las ecuaciones que describen su modelo. Sin embargo, COMSOL incorpora un importante número de sistemas físicos predefinidos con sus ecuaciones (modelos) agrupados en áreas temáticas (módulos) junto con librerías de materiales con un buen número de propiedades físicas relevantes (Torres y Grau, 2007).

Es posible describir entonces a COMSOL Multiphysics como una herramienta de resolución de ecuaciones en derivadas parciales basada en el método de los elementos finitos, que incorpora predefinidos una gran cantidad de modelos y que permite la utilización simultánea de diferentes modelos dando lugar a una resolución multifísica de un mismo problema (Torres y Grau, 2007). El entorno de trabajo del COMSOL incorpora

las fases fundamentales: definición del problema, resolución del mismo y posprocesado. La definición del problema se inicia seleccionando los modelos físicos a utilizar e introduciendo la geometría. El segundo paso consiste en especificar las propiedades físicas y las condiciones iniciales y de contorno en los diferentes subdominios de estudio. La etapa de resolución pasa por definir una malla de cálculo y especificar los parámetros del método de cálculo a utilizar (Torres y Grau, 2007).

2.7 Antecedentes

Actualmente no existen estudios sobre modelación y simulación del escaldado de *Rubus glaucus Benth* (mora de castilla) por elementos finitos utilizando geometría 3D, sin embargo, se referenciara a continuación las investigaciones realizadas en otros alimentos.

El estudio realizado por **Gallardo (2004)** en el Laboratorio de Procesamiento de Alimentos del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Universidad Austral de Chile, se basó en la determinación experimental del punto más lento de calentamiento/enfriamiento durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenenfriado en floretes de brócoli (*Brassica oleracea* L. var *italica*). Para lograr el objetivo se hizo necesaria la utilización de varios software; en el caso de la simulación del proceso de conducción de calor fue el software CAE, para lo cual se realizó un modelo digital 3D capturado de réplicas en yeso de floretes utilizando el digitalizador Microscribe 3DL y el software Rhinoceros 3.0 SR3c.; para el análisis de la transferencia de calor mediante el uso del análisis de los elementos finitos, se utilizó el software ALGOR v 15.®; la obtención de perfiles de temperatura mediante el método de diferencias finitas, se empleó

el software Foodheatcool v 1.0. Finalmente, se encontró que el punto más lento de calentamiento/enfriamiento en los procesos mencionados se encuentra aproximadamente a una distancia de 25 mm medidos axialmente desde la base del florete, lo que corresponde aproximadamente a una distancia de 5/6 de la longitud total del tallo, comprobándose esto con los perfiles de temperatura experimentales y simulados, los cuales durante el proceso combinado de escaldado/hidrogenenfriado a diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento térmico reflejaron un buen ajuste.

Rodríguez (2005), en el Laboratorio de Procesamiento de Alimentos y en el Laboratorio de Digitalización 3D en Ingeniería Asistida por Computador para el Procesamiento y Preservación de los Alimentos, ambos pertenecientes al Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, de la Universidad Austral de Chile, simuló mediante el método de elementos finitos para predecir los perfiles de temperaturas durante procesos de conducción de calor en espárragos (*Asparagus officinalis* L.), brócoli (*Brassica oleracea* L) y camarón (*Haliporoides diomedae*). Trabajó un tratamiento combinado de hidrocalentamiento/hidrogenenfriamiento para estudiar las distribuciones de temperatura. El modelo matemático para la conducción de calor en cuerpos irregulares complejos sujeto a condiciones de frontera convectivas constantes fue resuelto por el software de simulación basado en el Método de Elementos Finitos (ALGOR ®). Los resultados para el punto de más lento calentamiento de cada producto mostraron un buen ajuste entre los perfiles de temperatura experimentales y simulados.

En Argentina, **Lespinard et al., (2007)**, simularon la evolución de la temperatura de hongos (*Agaricus bisporus*) durante el escaldado, para un amplio rango de temperaturas

(50, 60, 70, 80 y 90°C). Para llevar a cabo esto, emplearon el método de elementos finitos (MEF) en el software Comsol 3.2, con propiedades termofísicas constantes, dominio 2D axisimétrico y 3D. El procesamiento de imágenes lo implementaron en la Image Processing Tolbox de Matlab®. Las temperaturas simuladas por el modelo 2D axisimétrico y 3D, fueron validadas exitosamente con las medidas experimentales, no encontrándose, en cada caso, diferencias significativas entre los resultados obtenidos para malla fija y móvil. El modelo de simulación 2D axisimétrico con malla móvil, resultó ser el más adecuado para el caso estudiado, presentando una buena concordancia con los datos experimentales, comparable a la obtenida con el modelo 3D malla móvil, y con un tiempo de procesamiento computacional inferior.

En Colombia, **Ortega *et al.*, (2011)**, simularon la evolución de la temperatura en el centro térmico y en la zona media entre la corteza y el corazón de la zanahoria durante el escaldado a 85 ± 1 °C, empleando el método de elementos finitos (MEF) con propiedades termofísicas constantes, dominio 3D, sin considerar contracción volumétrica. El modelo fue resuelto empleando el software COMSOL ® Multiphysics 3.5 y validado experimentalmente para un corte de zanahoria de forma cónica. El coeficiente h obtenido fue de $260 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Las temperaturas simuladas comparadas con las medidas experimentales, arrojan diferencias relativas medias de 2,14 % para el centro térmico y 3,54 % para la corteza. El modelo de simulación predijo satisfactoriamente la evolución térmica de la zanahoria durante el proceso de escaldado.

Mendoza *et al.*, (2012), estudiaron la cinética de inactivación de la enzima peroxidasa y la cinética del color y textura en tubérculos de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo

phureja) sometidos a escaldado mediante agua a 80°C, 90°C y vapor saturado a 93°C. Realizaron los perfiles de temperatura en el centro del tubérculo mediante termocuplas tipo *k* conectadas a un datalogger marca Center 309 y a partir de ellos determinaron los coeficientes de transferencia de calor, que para el escaldado en agua oscilaron entre 214 y 230 W °C⁻¹ m⁻² mientras que para vapor saturado fueron en promedio 84.5 W °C⁻¹m⁻². A diferentes tiempos de precocción el tubérculo de papa criolla presentó una zona en donde ocurrió pardeamiento enzimático, hecho que fue modelado según la cinética de Michaelis-Menten y otra zona en donde el cambio de color disminuyó debido a la inactivación enzimática que correspondió a una cinética de primer orden, de manera similar al comportamiento de la textura. La inactivación de la enzima peroxidasa obedeció al mecanismo de Lumry–Eyring.

Madera y Tarrá (2014), Determinaron el coeficiente convectivo de transferencia de calor del proceso de escaldado de ahuyama, a temperaturas de 70,80 y 90°C, a través de la simulación del mismo empleando el software COMSOLTM Multiphysics 3.5 versión evaluación, para lo cual se llevó a cabo la medición de la historia térmica interna, de fragmentos de ahuyama de forma triangular con dimensiones conocidas, usando termopares tipo K referencia NI USB- TC01 fabricados por National Instruments. En donde encontraron que para 70 °C el valor promedio de *h* fue de 1343 W/m² *K, para 80 °C fue de 455 W/m² *K y para 90°C fue de 535 W/m²*K.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales.

3.1.1. Materia prima: Para el desarrollo del proyecto investigativo se utilizaron moras de castilla (*Rubus glaucus Benth*) obtenidas en el almacén de cadena Éxito de la ciudad de Bogotá (Ver Anexo A), seleccionándolas por la variedad, peso, y la forma, las cuales fueron conservadas bajo temperatura de refrigeración.

3.1.2. Equipo de escaldado: Para el proceso del escaldado se empleó una freidora-escaldadora marca Premium, modelo PDF302T con capacidad de 3 litros, en material de acero inoxidable.

3.1.3. Medición de temperaturas: Se usaron termopares con sensores tipo K referencia NI USB- TC01 fabricado por National Instruments.

3.1.4. Medición de las dimensiones: se realizaron mediciones de cada una de las moras seleccionadas, seis mediciones como se muestra en la Figura 1 y en la Tabla 2, 3 y 4 para cada temperatura, éstas fueron tomadas con la ayuda de un calibrador vernier.

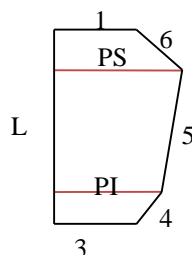


Figura 1. Mediciones tomadas a las moras.

La Figura 1 es la aproximación geométrica del corte transversal real de la mora; las partes 4 y 6 se asumieron rectas, pero fueron medidas curvas con la ayuda de un hilo.

3.2. Diseño metodológico

3.2.1. Muestras: Se lavaron las muestras frescas, se seleccionaron por tamaño y forma. Dichas muestras se sometieron a un proceso de escaldado a 70, 80 y 90 °C.

3.2.2. Fase experimental: Esta investigación se llevó a cabo entre los meses de agosto y noviembre de 2014. Para el desarrollo de ésta, se usó una freidora-escaldadora marca Premium, modelo PDF302T, escaldando las moras a temperaturas de 70 °C, 80 °C y 90 °C. Se realizaron cuatro experimentos para cada temperatura. Se realizó un precalentamiento de la freidora-escaldadora de aproximadamente 15 minutos, donde la temperatura del mismo incrementó desde una temperatura inicial (igual a la temperatura ambiente) hasta una temperatura final ($70 \pm 2^\circ\text{C}$, $80 \pm 2^\circ\text{C}$, $90 \pm 2^\circ\text{C}$) manteniéndose constante. Posteriormente, se procedió al registro de tiempo y temperatura de escaldado, empleando un sistema de adquisición de datos, para lo cual se introdujo, previamente, un termopar tipo K referencia NI USB- TC01 fabricado por National Instruments, en el centro geométrico de cada muestra y otro en el centro de la freidora-escaldadora (Ver Anexo B).

Una vez sumergida la muestra en la freidora-escaldadora, se dio inicio a la interfaz en LabVIEW (realizándose previo montaje) y obteniéndose las historias térmicas de cada muestra y del entorno (Ver Anexo C).

3.2.3 Modelos de la transferencia de calor

Un modelo matemático fue desarrollado para describir la transferencia de calor conductiva a través de la mora (Ecuación 6, 7 y 8) con:

$$\textbf{Centro térmico: } \rho C_p \frac{dT}{dt} = (k \nabla T) \quad (6)$$

$$\textbf{Condiciones de frontera: } k \nabla T = h (T_\infty - T) \quad (7)$$

$$\textbf{Condición inicial: } T(x, y, z, t=0) = T_0 \quad (8)$$


Donde:

ρ : Densidad de la mora; C_p : Calor específico de la mora; k : Conductividad térmica; T_∞ : Temperatura de escaldado; T : Temperatura centro térmico; t : Tiempo; T_0 : Temperatura Inicial de la muestra.

3.3 Simulación del proceso de escaldado

Se empezó a crear el mapeo de la estructura de la mora y la simulación del proceso de escaldado de la misma, empleando el software COMSOLTM Multiphysics 3.5 versión evaluación, con cada uno de los registros de tiempo y temperatura obtenidos de manera experimental. Para ello se llevaron a cabo los siguientes pasos:

3.3.1 Modelación geométrica

Se seleccionó del menú el icono line  y trazar una línea, que será el largo (L) como se mostró en la Figura 1.

- Se dio doble clic en la línea; al instante se mostrará un cuadro “**object properties**”, seleccionar la opción **1** en **curve selección** donde se ingresaran las coordenadas (x, y)

para cada línea en el cuadro **curve properties**. (Las dimensiones son introducidas en metros). (Ver Anexo D)

- Se dio click en **OK**.
- Se realizó lo mismo para las líneas 1,3,4,5 y 6

Para las líneas L (Largo), 1, 3, 4, 5 y 6, se referencian los valores en las Tablas 5, 6 y 7, para cada temperatura. El ingreso de los datos y las tablas se evidencian el anexo D y E.

Para obtener las coordenadas de la parte 4, se procedió a realizar un triángulo rectángulo, y por medio del Teorema de Pitágoras, se obtuvo la coordenada en el eje Y, como se observa en la Figura 2.

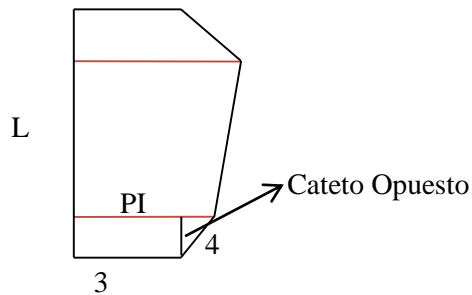



Figura 2: Triángulo- Rectángulo para obtener la coordenada Y en 4.

En el caso de la dimensión 6, también fue necesario realizar Teorema de Pitágoras, como se mostró en la Figura 2.

- Finalmente, queda construida la estructura de las moras, asemejándose a su figura geométrica real. (Ver Anexo F)
- Al formarse la figura anterior, se procede a seleccionar todas las líneas y forzar solido (coerce to solid)  (Ver Anexo G)

- Se seleccionó en el menú **Draw** y luego **Revolve**; se despliega una ventana **Objects to revolve**, seleccionando CO1, y en la opción **Second point** colocar el valor x:0 y y:1; para que la figura gire en el eje y.
- Se dio click en **OK.**, obteniendo la figura en 3D. (Ver Anexo H).
- En el menú se seleccionó **Multiphysics → Model Navigator → 3D → COMSOL Multiphysics → Heat Transfer → Conduction → Transient analysis → OK**

3.3.2 Configuración física

- Se seleccionó en el menú, la opción **Physics** y se selecciona **Subdomain Settings**.
- En **Subdomain Settings** se eligió la **opción 1**, e ingresar los valores de densidad **ρ** , calor específico **C_p** , y conductividad **k** que se obtuvieron a través de la ejecución de Choi y Okos para cada temperatura. (Ver Anexo I)

Para el cálculo de las anteriores propiedades térmicas se tuvo en cuenta la temperatura del ambiente (30 °C), por tanto los valores se determinaron a una temperatura promedio así:

$$\rightarrow \text{Para } 70^{\circ}\text{C} = \frac{70+30}{2} = 50^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \text{Para } 80^{\circ}\text{C} = \frac{80+30}{2} = 55^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \text{Para } 90^{\circ}\text{C} = \frac{90+30}{2} = 60^{\circ}\text{C}$$

Tabla 2. Propiedades termofísicas de la mora a las diferentes temperaturas de escaldado.

Temperatura °C	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg*K)	k (W/m*K)
50	1046.14	3784.73	0.6041
55	1044.16	3783.30	0.6093
60	1042.01	3781.58	0.6142

- Se dio click en **Apply**.

- En **Init** se ingresó la temperatura inicial de la muestra **T(t₀)** de los valores experimentales arrojados por el sistema de adquisición de datos para cada una de las muestras a la temperatura correspondiente. (Ver Anexo J)
- Se dio click en **Apply** y seguidamente Click en **OK**

3.3.3 Ajustes de contorno

- En **Physics** se seleccionó **Boundary Settings → Groups → unnamed 1**
- En la lista **Boundary condition** se escogió la opción **Heat Flux**.
- En **Heat flux** se ingresó un valor inicial de “**h**” supuesto (W/m²*K) y posteriormente el valor de la temperatura del fluido (K) en **Tinf** (70 °C, 80 °C, 90 °C; como sea el caso). (Ver Anexo K)
- Se dio click en **Apply** y seguidamente Click en **OK**

3.3.4 Generación de la malla

- En la barra de herramientas, se hizo click en el botón **Initialize Mesh**.
- Luego, se seleccionó la opción **Refine mesh**. (Ver generación de malla en anexo L)

3.3.5 Cálculo de la solución

- Se dio click en el botón **Solve** en la barra de herramientas.
- Se escogió la opción **Solver Parameters** y en **Times** se colocó el tiempo de la siguiente forma (0:1:264), donde 1 indica que se tomara los valores de segundo en segundo y el ultimo valor, indica el tiempo que se tardó la muestra en alcanzar la temperatura del medio, el cual varía dependiendo de la muestra. (Ver ingreso de datos en anexo M)
- Se dio click en **Apply** y seguidamente Click en **OK**

- Se seleccionó la opción **Solve** en la barra de herramientas y luego **Solve Problem** y se esperó a que se resolviera el problema (Ver en anexo N).

3.3.6 Postprocesado y visualización

- En el menú **Postprocessing**, se escogió la opción **Cross-Section Plot Parameters** → **Point**.
- En **Point** se seleccionó la opción °C en la lista de unidades **Unit**.
- En **Coordinates** se ingresaron en y: la mitad de la dimensión del largo (L) y en x: el valor que concuerda de la longitud 5 y el largo. (Ver en anexo O, ingreso del centro térmico de la mora)

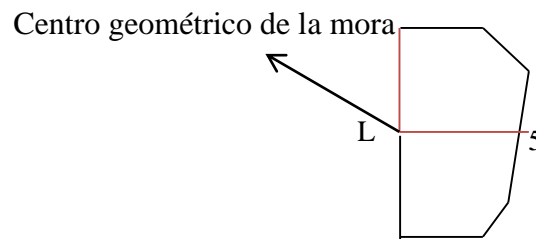


Figura 3: Estructura del centro térmico de la mora.

- Se dió click en **Apply**.
- Inmediatamente apareció el grafico de punto, como se muestra en el anexo P.
- Se dio click en el icono **ASC** y exportar los datos, a continuación se seleccionó → **save** → **OK**.
- Los datos fueron exportados como block de notas, se reemplazó punto por coma, y se guardó.

- Se abrió Microsoft Excel; se dio en el menú **Archivo**, luego en **Abrir** y se seleccionó el archivo de los datos. En el asistente para importar datos, se seleccionó **De ancho fijo**, seguidamente **siguiente**→**siguiente**→ **finalizar**.
- Después se hizo un cambio (aumentar o disminuir) en el valor de h , obteniendo un nuevo perfil térmico. Se repitió las veces que se consideró necesario, y por último se validó el modelo.

3.4. Validación del modelo

Para la simulación en cada muestra se evaluaron los residuales con la ayuda de Statgraphics Centurion V XV debido a que son una herramienta para diagnosticar el modelo, ya que son los estimadores de las perturbaciones. Para determinar cuáles medias de coeficientes convectivos de transferencia de calor son estadísticamente diferentes de las otras se realizó una prueba de múltiples rangos, a través del mismo software.

El modelo matemático se validó comparando las temperaturas obtenidas experimentalmente con las simuladas. Dichas comparaciones se realizaron teniendo en cuenta el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor que representó el mínimo error medio relativo absoluto (Ecuación 9):

$$\epsilon_{\text{medio}} (\%) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{T_s - T_e}{T_e} \times 100 \quad (9)$$

Dónde:

T_s : temperatura simulada (°C o K); T_e : temperatura experimental (°C o K); m : tiempo gastado para alcanzar la temperatura del medio (s).

Adoptándose como criterio ingenieril un porcentaje de error medio relativo absoluto máximo de 5%.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Medidas de las dimensiones de la mora: En el anexo E se observan los valores de las mediciones tomadas a las moras para cada temperatura correspondiente.

4.2. Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto

Al determinar h de esta manera, se realiza con el objetivo de poder usar una hoja de cálculo para hallar un mínimo global. La finalidad es comparar los perfiles de temperatura de los h simulados que presenta el menor error absoluto relativo con el experimental. Al comparar los resultados experimentales con los simulados, se obtuvo diversos valores de % error medio relativo absoluto, que corresponden a cada coeficiente convectivo evaluado, arrojando los siguientes comportamientos:

4.2.1 Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto para la temperatura de 70°C.

4.2.1.1. Muestra 1: En el grafico 1 se muestra el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 70°C. En el anexo Q se relacionan los datos.

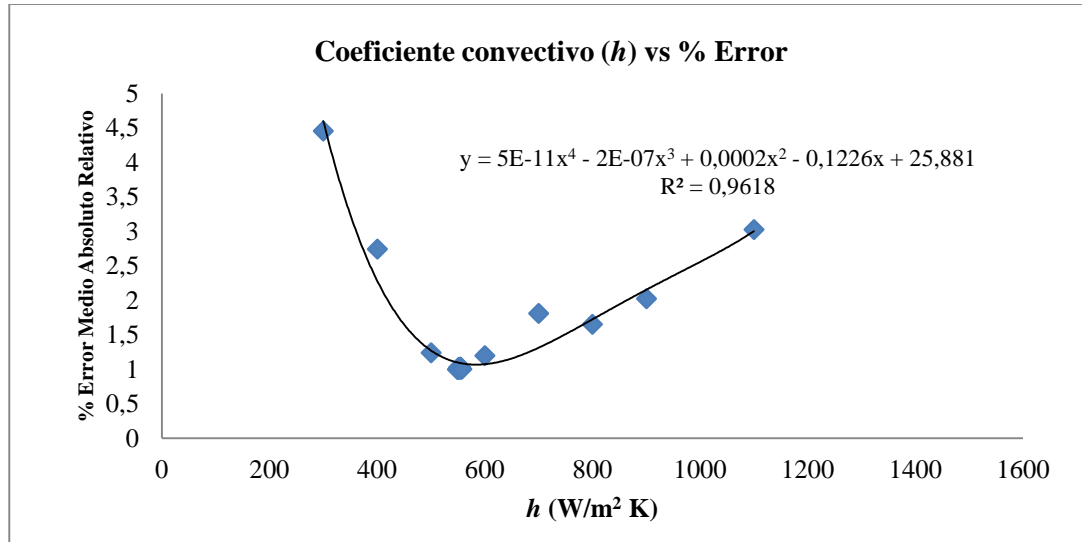


Gráfico 1. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 1. Temperatura de 70°C.

En el gráfico 1 se puede apreciar que el mínimo absoluto corresponde al valor del coeficiente convectivo simulado $h = 550 \text{ W/m}^2\text{K}$, siendo este el apropiado para el proceso de escaldado de la muestra 1 a 70°C. Para este coeficiente convectivo de transferencia de calor, el error medio absoluto relativo fue de 0.9972%, el cual se puede evidenciar en la Tabla 8. La relación de las variables % Error medio relativo absoluto y coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) es inversamente proporcional hasta que se alcanza el mínimo valor de error, a partir de allí el porcentaje de error aumenta a medida que lo hace el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 96.18%, lo que significa que existe un buen ajuste de los datos con respecto al modelo, lo que se puede corroborar con el análisis de residuales (Ver Anexo R), en donde se observa que no hay indicación de correlación serial en los residuos y la distribución de los errores es aproximadamente normal.

4.2.1.2. Muestra 2: En el gráfico 2 se evidencia el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 70°C . En el anexo S se relacionan los datos.

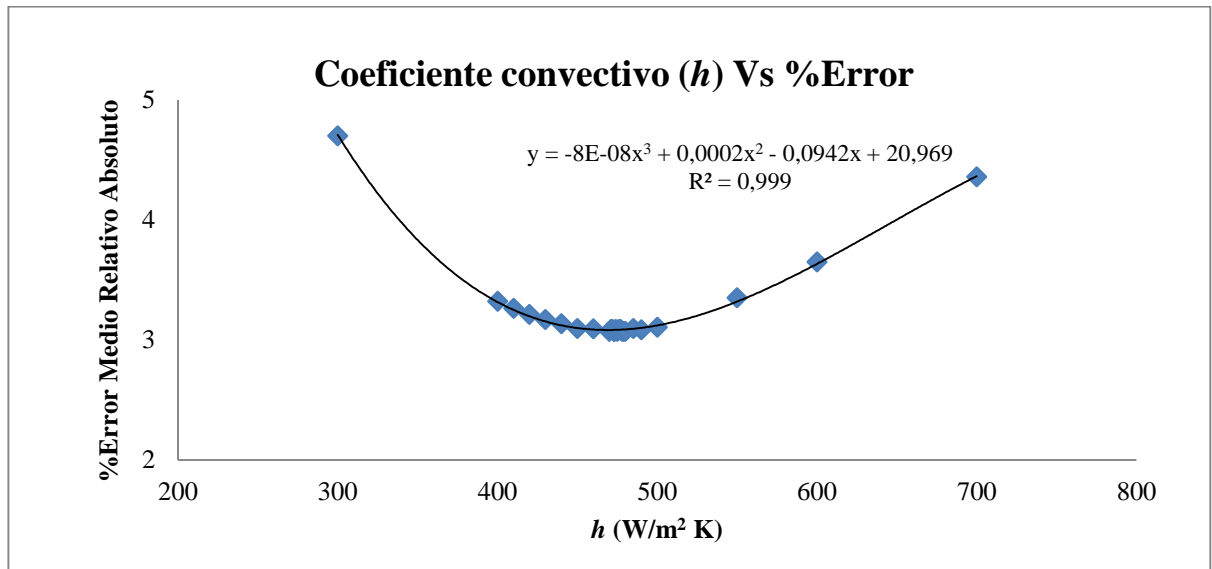


Gráfico 2. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 2. Temperatura de 70°C

Para la muestra 2 a temperatura de 70°C , se puede apreciar que a medida que aumenta el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), disminuye el porcentaje de error, hasta el valor de h de $473 \text{ W/m}^2\text{K}$ (siendo este el h mínimo global), a partir de este punto el porcentaje de error aumenta, indicándose que el valor de h para esta muestra fue el enunciado anteriormente.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 99,9% de la variabilidad en el %Error medio relativo absoluto, reflejando un buen ajuste del modelo. Al analizar los residuales se observó que no hay indicación de correlación serial en los residuos (Ver Anexo T), se observan valores de residuos alejados de los demás datos, pero no alejados

de la línea cero, los cuales no alteran gravemente el ajuste del modelo, ya que la distribución de los errores es aproximadamente normal.

4.2.1.3. Muestra 3: En el anexo U se relacionan los datos que se reflejan en el Gráfico 3, donde se muestra el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 70°C .

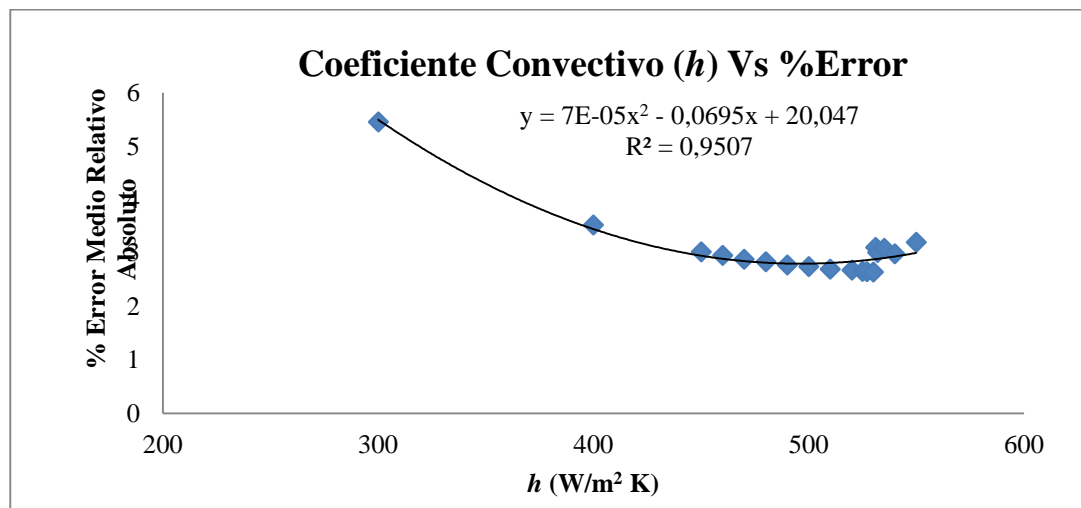


Gráfico 3. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 3. Temperatura de 70°C .

En el gráfico 3, se presentan los datos correspondientes a la muestra 3 para la temperatura de 70°C , evidenciándose que el coeficiente convectivo de transferencia de calor es $530 \text{ W/m}^2\text{K}$, el cual se obtuvo al minimizar el error medio relativo absoluto entre los valores de temperatura experimentales y los predichos por el modelo.

El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 95.07%, lo que significa que existe un buen ajuste de los datos con respecto al modelo, lo que se verificó con el gráfico de residuales (Ver anexo V), en donde se observa que no hay indicación de correlación serial en los residuos y la distribución es normal.

4.2.1.4. Muestra 4: En el anexo W se muestra la Tabla 10, relacionándose en esta los datos del Gráfico 4.

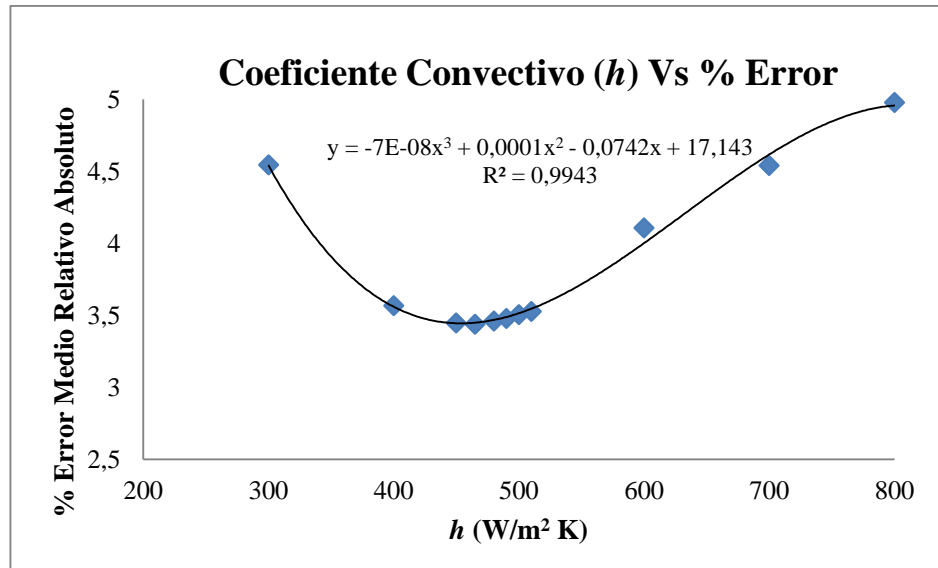


Gráfico 4. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 4. Temperatura de 70°C.

En el Grafico 4 se observa la dependencia que existe entre las variables % error y coeficiente convectivo h y la incidencia que el cambio o la variación de una de ellas tiene sobre la otra. Para ésta muestra sometida a una temperatura de 70 °C, el valor de h al cual corresponde el menor porcentaje de error medio relativo absoluto fue de 465 W/m²K, el cual se puede evidenciar en el gráfico 4.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 99,43% de la variabilidad en el %Error medio relativo absoluto, reflejando un buen ajuste del modelo. El Gráfico de residuales mostrado en el anexo X muestra que no hay indicación de correlación serial en los residuos y que la distribución de los errores es normal.

4.2.2. Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto para la temperatura de 80°C.

4.2.2.1 Muestra 1: En el anexo Y se muestran los datos que se relacionan en el Gráfico 5.

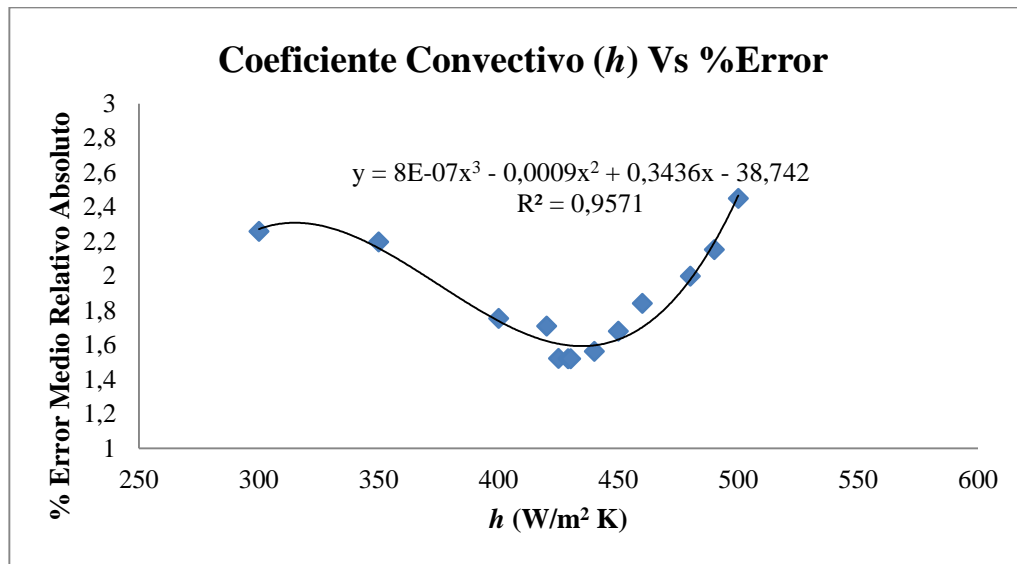


Gráfico 5. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 1. Temperatura de 80°C.

Durante el desarrollo de la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el fluido de calentamiento y la muestra 1 sometida a 80 °C permitió obtener los resultados que se relacionan en el gráfico anterior, explicándose de este modo la proximidad del valor de h simulado con el proceso real de escaldado a las condiciones mencionadas. El Gráfico 5 muestra que el h obtenido fue de 429 $\text{W/m}^2\text{K}$, el cual fue el que presentó el menor % de error mínimo relativo absoluto, mostrado en la Tabla 12 del anexo Y.

El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 95.71%, lo que significa que existe un buen ajuste de los datos con respecto al modelo, contrastándose esto con el

gráfico de residuales de esta muestra (Ver anexo Z), en donde se observa que no hay indicación de correlación serial en los residuos y la distribución de los errores es normal.

4. 2.2.2 Muestra 2: En el Grafico 6 se muestra el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 80°C . En el anexo AA se relacionan los datos.

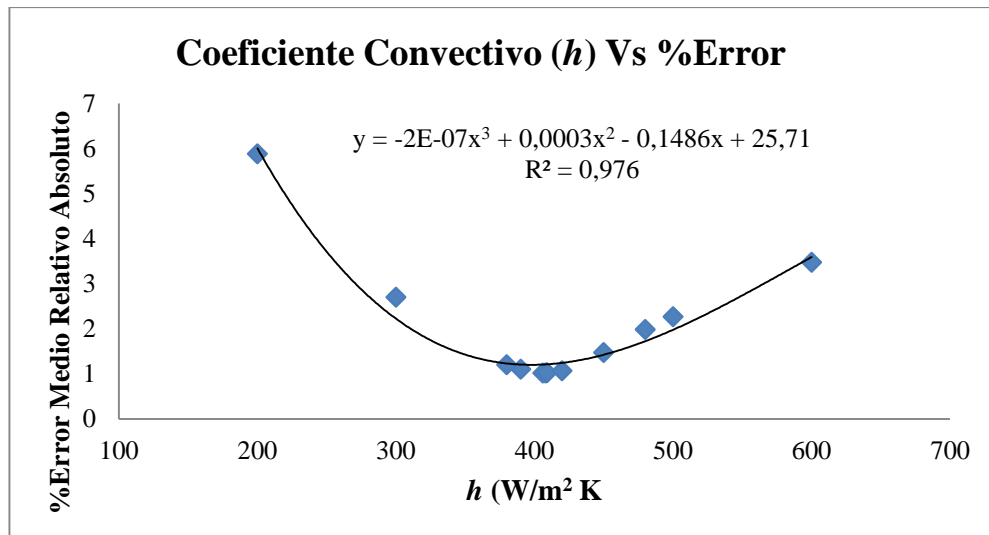


Gráfico 6. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 2. Temperatura de 80°C .

Para la muestra 2 a temperatura de 80°C , se evidencia que el valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor h es de $408 \text{ W/m}^2\text{K}$ mostrado también en la Tabla 13, este h es el apropiado para el proceso de escaldado de dicha muestra. Para este coeficiente convectivo de transferencia de calor, el error medio absoluto relativo fue de 1.0225%, el cual fue el más bajo para los coeficientes convectivos simulados.

El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 97.6%, lo que significa que existe un buen ajuste de los datos con respecto al modelo, lo que se verificó con el gráfico de

residuales (Ver anexo AB), en donde se observa que no hay indicación de correlación serial en los residuos y la distribución de los errores es normal.

4.2.2.3 Muestra 3: En el anexo AC se relacionan los datos que se reflejan en el Grafico 7, donde se muestra el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 80°C .

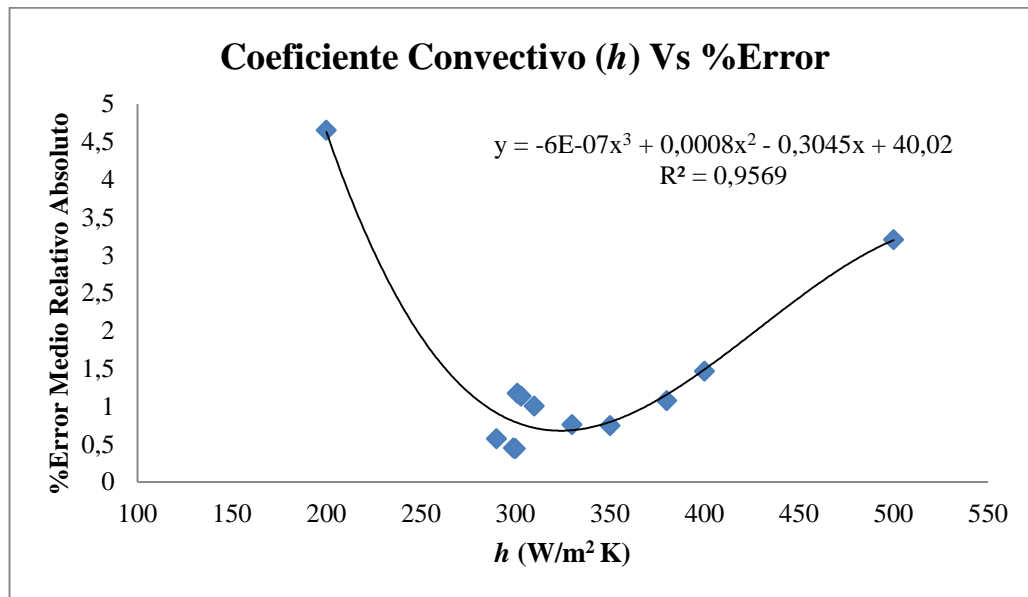


Gráfico 7. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 3. Temperatura de 80°C .

El Gráfico 7 muestra la relación de los coeficientes convectivos de transferencia de calor simulados y el porcentaje de error medio relativo absoluto, donde el mínimo absoluto es el correspondiente al valor de $300 \text{ W/m}^2\text{K}$, el cual es el más apropiado para el proceso de escaldado de la muestra 3 a 80°C . Para este coeficiente convectivo de transferencia de calor, el error medio absoluto relativo fue de 0.4430% como se muestra en la Tabla 14 del anexo AC, el cual fue el valor más bajo para los coeficientes convectivos simulados para dicha muestra.

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 95,69% de la variabilidad en el %Error medio relativo absoluto, reflejando un buen ajuste del modelo. El Gráfico de residuales mostrado en el anexo AD muestra que no hay indicación de correlación serial en los residuos y que la distribución de los errores es normal.

4.2.2.4 Muestra 4: El anexo AE suministra los datos de coeficiente convectivo de transferencia de calor h y porcentaje de error medio relativo absoluto que se relacionan en el Grafico 8, a temperatura de 80°C.

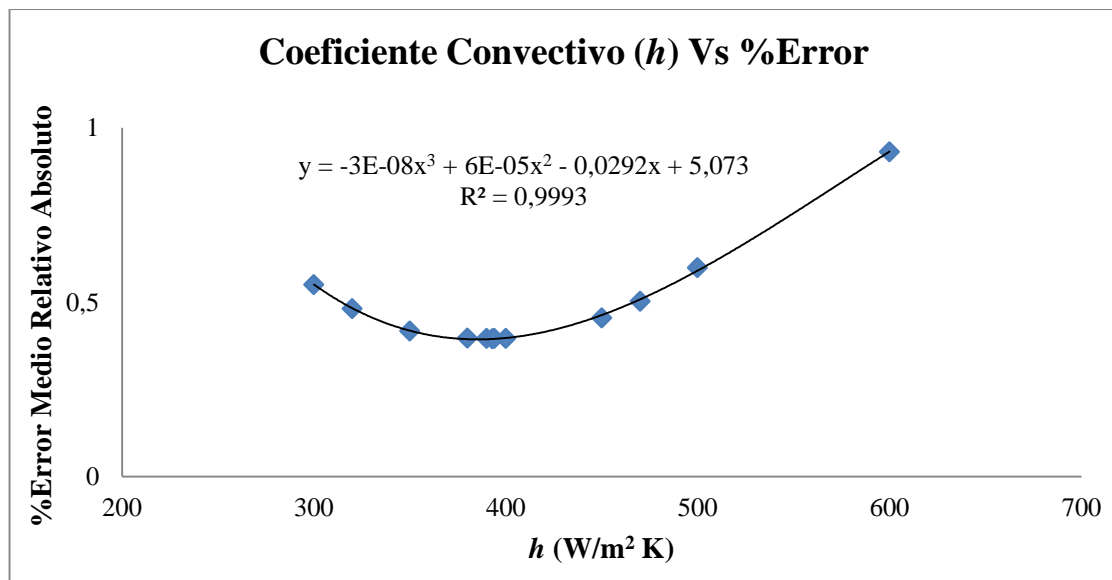


Gráfico 8. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 4. Temperatura de 80°C.

El Gráfico 8, evidencia el comportamiento del % error medio relativo absoluto con respecto a los valores de h simulados. Es una relación inversamente proporcional hasta cierto valor de h que para este caso fue de 393 W/m²K mostrado también en la Tabla 15, el cual corresponde al mínimo valor de error medio relativo absoluto. El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 99.93%, lo que significa que existe un buen ajuste de los datos con respecto al modelo, lo que se verificó con el gráfico de residuales (Ver

anexo AF), en donde se observa que no hay indicación de correlación serial en los residuos y la distribución es normal.

4.2.3. Coeficiente convectivo (h) Vs. % Error medio relativo absoluto para la temperatura de 90°C.

4.2.3.1 Muestra 1: En el anexo AG se relacionan los datos que se reflejan en el Gráfico 9, donde se muestra el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de Calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 70°C.

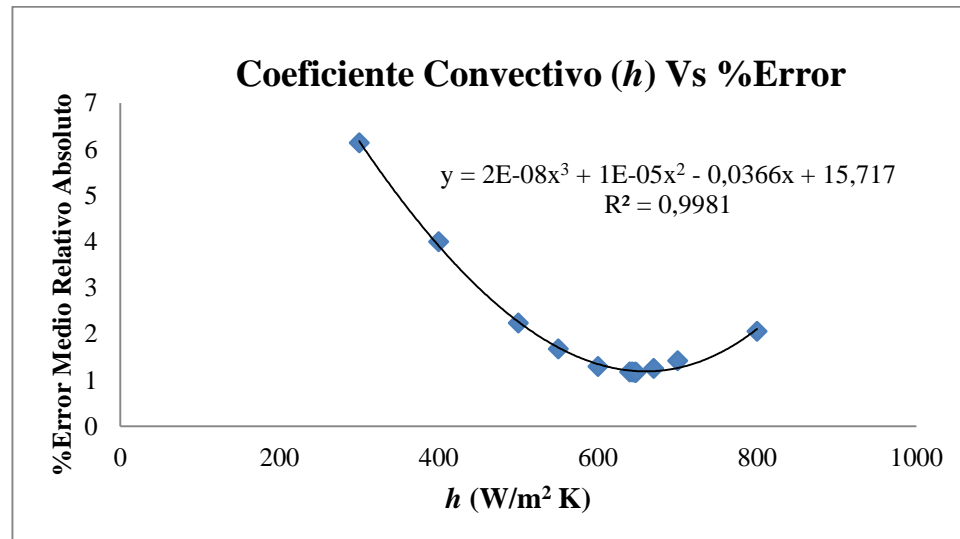


Gráfico 9. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 1. Temperatura de 90°C.

Para la muestra 1 a temperatura de 90°C, se evidencia que el coeficiente convectivo de transferencia de calor h es de 647 W/m²K, el cual fue el apropiado para el proceso de escaldado de dicha muestra a esta temperatura, reflejado en el % de error medio absoluto relativo menor (1,1749%). El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 99.81%, Reflejando un buen ajuste de los datos con respecto al modelo; con el gráfico de residuales (Ver anexo AH), se observan valores de residuos alejados de los demás datos,

pero no alejados de la línea cero, los cuales no alteran gravemente el ajuste del modelo, ya que la distribución de los errores es aproximadamente normal.

4.2.3.2 Muestra 2: En el Grafico 10 se muestra el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 90°C . En el anexo AI se relacionan los datos.

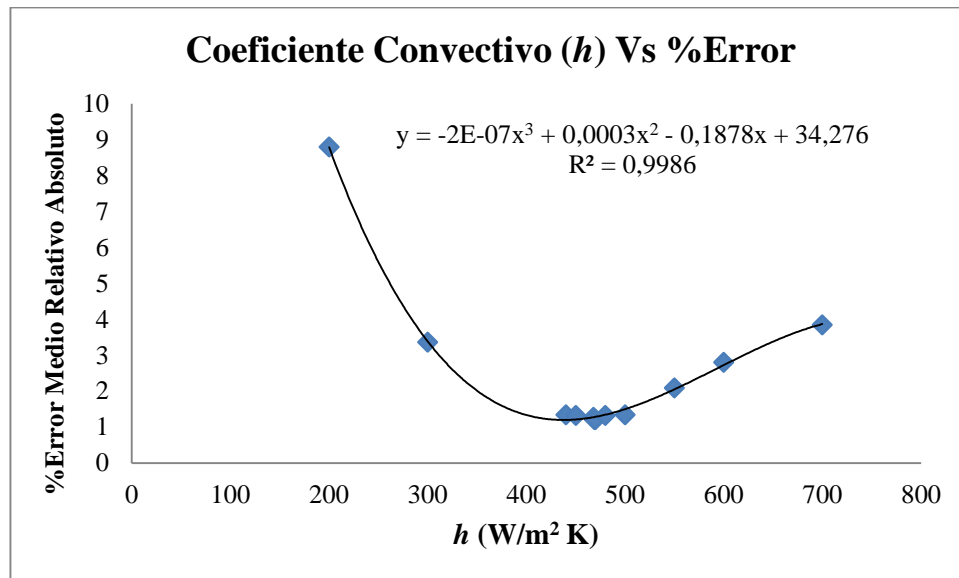


Gráfico 10. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 2. Temperatura de 90°C .

En el Gráfico 10 se refleja que el h que obtuvo el mínimo % error medio relativo absoluto fue el valor de h de $469 \text{ W/m}^2\text{K}$.

El estadístico R^2 indica que el modelo así ajustado explica el 99,86% de la variabilidad en el %Error medio relativo absoluto, reflejando un buen ajuste del modelo. El Gráfico de residuales mostrado en el anexo AJ muestra que no hay indicación de correlación serial en los residuos y que la distribución de los errores es normal.

4.2.3.3 Muestra 3: En el anexo AK se reflejan los datos de coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error para la temperatura de 90°C de esta muestra, relacionándose en esta los datos del Grafico 11.

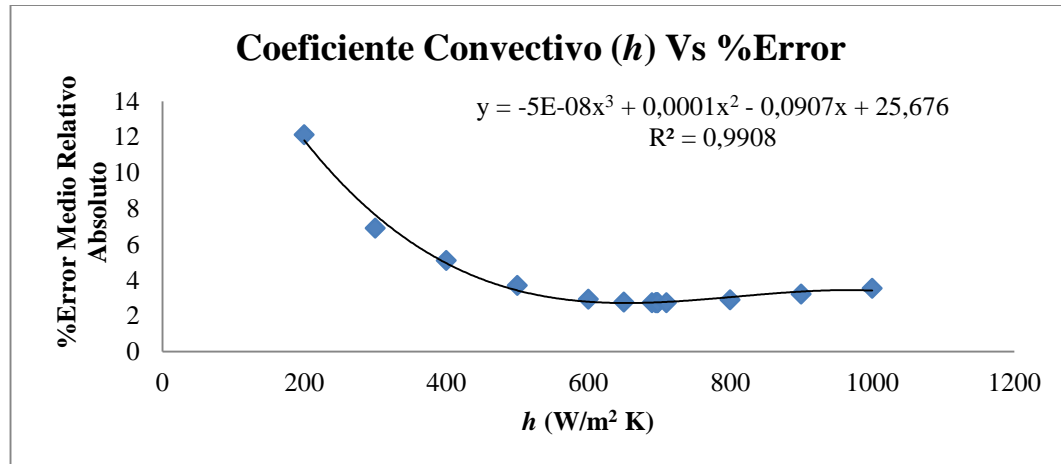


Gráfico 11. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 3. Temperatura de 90°C.

Se observa que el coeficiente de transferencia de calor determinado, teniendo en cuenta el mínimo porcentaje de error relativo absoluto arrojado al simular el proceso de calentamiento de la muestra 3 de masa sometida a 90 °C es de 696 W/m²K, como se muestra en la Tabla 18 del anexo AK.

El coeficiente de determinación para este caso arrojó un valor de 99,08%, lo que indica que los datos se ajustan bien al modelo, caso corroborado con el gráfico de residuales que se muestra en el anexo AL, el cual evidencia que no existe una correlación serial en los residuos y la distribución es normal.

4.2.3.4 Muestra 4: En el Grafico 12 se evidencia el comportamiento del coeficiente convectivo de transferencia de calor h y el porcentaje de error medio relativo absoluto para la temperatura de 90°C. En el anexo AM se relacionan los datos.

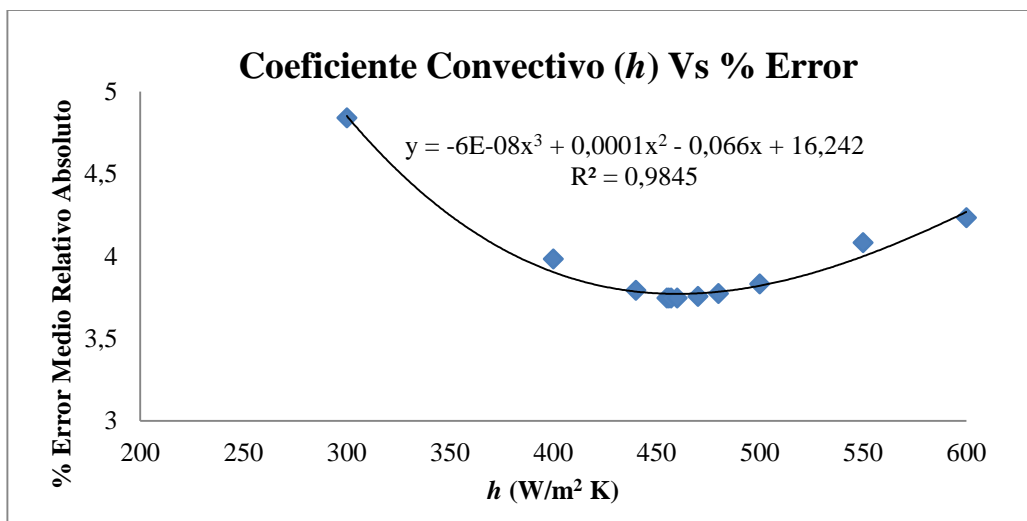


Gráfico 12. Coeficiente convectivo (h) vs %Error medio relativo absoluto para la Muestra 4. Temperatura de 90°C.

El valor de h que presentó el mínimo % error medio relativo absoluto fue el valor de 456 W/m²K, a partir de este dato numérico el error aumenta gradualmente como se observó en casos anteriores.

El coeficiente de determinación R^2 para este caso fue de 98.45%, lo que significa que existe un buen ajuste de los datos con respecto al modelo, lo cual se verificó con el gráfico de residuales (Ver anexo AN), en donde se observa que no hay indicación de correlación serial en los residuos y la distribución de los residuos es normal.

4.3. Temperatura de escaldado Vs. Coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Después de obtener los resultados descritos anteriormente, se procedió a tabular cada temperatura de simulación de escaldado de las moras (70°C, 80°C y 90°C) y el promedio de los valores de h (coeficiente convectivo de transferencia de calor) arrojados para cada una de las muestras.

Tabla 3. % error medio relativo absoluto correspondiente a cada muestra y temperatura de escaldado.

	Temperatura de 70°C		Temperatura de 80°C		Temperatura de 90°C	
Repeticiones	<i>h</i>	%Error	<i>h</i>	%Error	<i>h</i>	%Error
Muestra 1	550	0,997	429	1,521	647	1,175
Muestra 2	473	3,070	408	1,022	469	1,208
Muestra 3	530	2,646	300	0,443	696	2,747
Muestra 4	465	3,436	393	0,396	456	3,746
Promedio	504,5	2,537	382,5	0,846	567	2,219
Desviación Estándar	41,9	1,077	56,9	0,533	122,4	1,254

En la Tabla 3, se muestran los datos de porcentaje de error medio relativo absoluto para cada uno de los coeficientes convectivos de transferencia de calor promedio determinados en cada temperatura y a las diferentes muestras. De acuerdo a lo presentado, se puede observar que los porcentajes de error medio relativo absoluto calculados se encuentran en el rango de 0.997% - 3.749%, estos valores se encuentran por debajo del criterio ingenieril adoptado (5%).

Al observar las desviaciones estándar de los errores, se puede inferir que no existe mayor dispersión entre los datos para cada temperatura, lo que quiere decir, que la metodología de optimización dinámica utilizada, fue apropiada para la explicación de la fenomenología física de la transferencia de calor, en el proceso de escaldado de mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*) a temperaturas de 70°C, 80°C y 90°C.

Una vez realizada la prueba de múltiples rangos se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Prueba de múltiples rangos

Temperatura de escaldado	Repeticiones	h promedio
70°C	4	504,5
80°C	4	382,5
90°C	4	567,0

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
70 – 80°C		122,0	130,571
70 – 90°C		-62,5	130,571
80 – 90°C	*	-184,5	130,571

* indica una diferencia significativa.

El asterisco señala que este par de temperaturas (80-90°C) muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza. Las temperaturas de 70-80°C y 70-90°C no presentan diferencias estadísticamente significativas, ya que la diferencia entre los h promedio es inferior al límite (130,571).

En el rango de temperaturas de 70-80°C, la resistencia a la transferencia de calor disminuye gradualmente, y con ello descende el valor de h ; caso contrario ocurre en el rango de temperaturas de 80-90°C, presentándose un aumento del valor de h .

Los valores promedios de h arrojados para 70, 80 y 90 °C fueron $504.5 \pm 41.9 \text{ Wm}^2/\text{K}$, $382.5 \pm 56.9 \text{ Wm}^2/\text{K}$ y $567 \pm 122.4 \text{ Wm}^2/\text{K}$ respectivamente; valores aproximados a los determinados por Mendoza y Herrera (2012), quienes evaluaron la cinética de inactivación de la enzima peroxidasa y la cinética del color y textura en tubérculos de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo *phureja*) sometidos a escaldado mediante agua a

80 y 90°C; encontrándose coeficientes convectivos de transferencia de calor de 214 W °C⁻¹ m⁻² y 230 W °C⁻¹ m⁻². Madera y Tarrá (2014), determinaron coeficientes convectivos de transferencia de calor para el proceso de escaldado en muestras de ahuyama a temperaturas de 70, 80 y 90°C, resultado los valores en el rango de 455 W/m²K a 1343 W/m²K.

Los coeficientes convectivos de transferencia de calor determinados en este estudio, fueron el resultado de utilizar el agua como fluido de calentamiento, siendo esta un fluido de baja viscosidad. Según Zuritz *et al.*, (1990) mencionan que los valores de h disminuyen al aumentar la viscosidad aparente del fluido que transmite calor. Esto se debe, a que al aumentar la viscosidad, se genera menor turbulencia, lo cual reduce la tasa de transferencia de calor convectiva.

4.4 Validación del modelo

Los comportamientos obtenidos al graficar los perfiles de temperatura y tiempos determinados experimentalmente y los determinados mediante la simulación se evidencian en los siguientes gráficos:

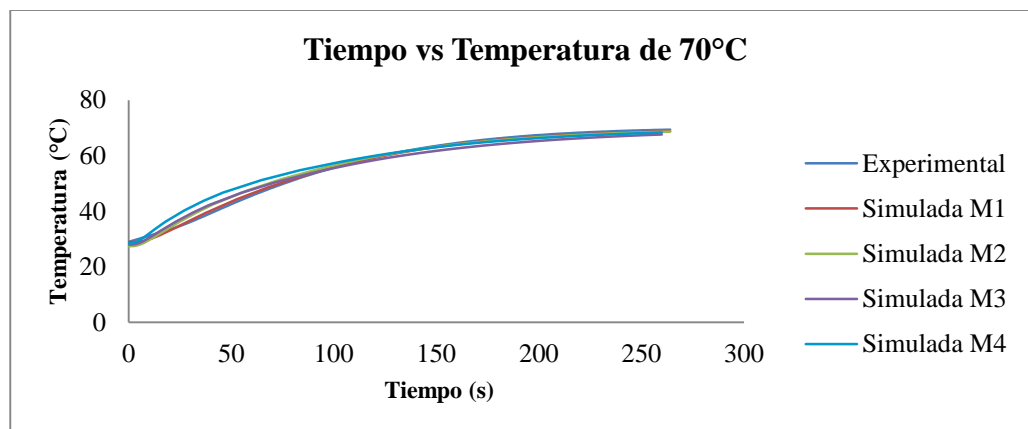


Gráfico 13. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso de escaldado de mora a 70 °C.

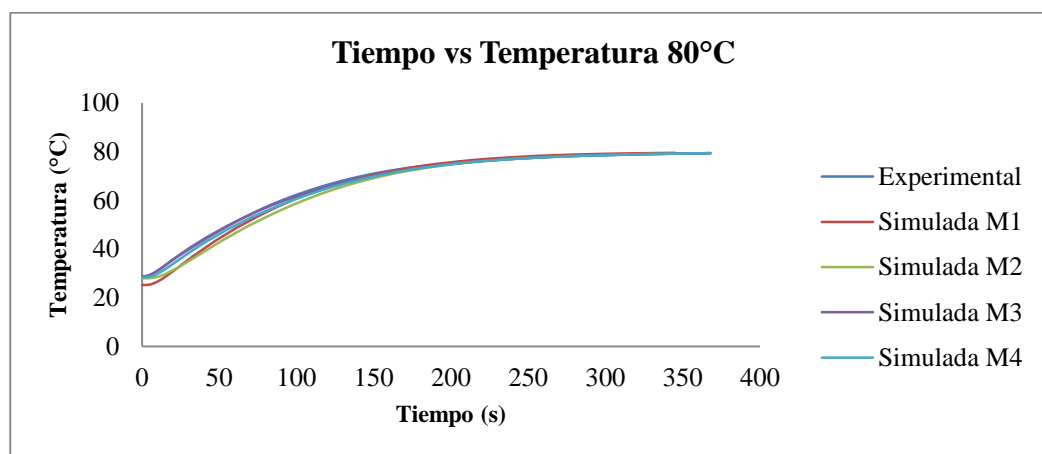


Gráfico 14. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso de escaldado de mora a 80 °C.

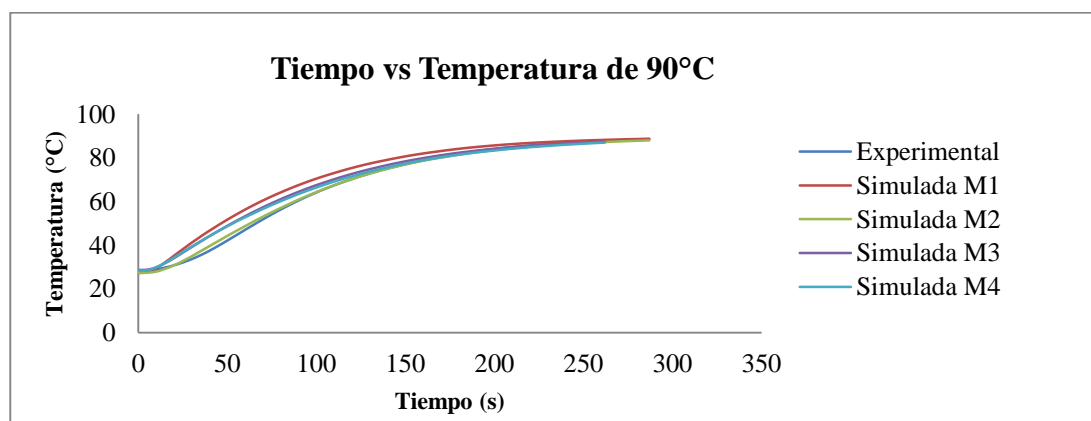


Gráfico 15. Perfiles de temperatura experimentales y simulados durante el proceso de escaldado de mora a 90 °C.

Los gráficos 13, 14 y 15 muestran las historias térmicas experimentales y simuladas con COMSOL™ Multiphysics 3.5 versión evaluación, durante el proceso de escaldado de mora de castilla, presentando comportamientos semejantes; ya que al observar los perfiles de temperatura para 70, 80 y 90°C reportados se puede apreciar la superposición entre las curvas experimentales y simuladas. Las temperaturas simuladas para el centro térmico, durante el escaldado a 70, 80, 90°C, resultaron en buena concordancia con las temperaturas determinadas experimentalmente, encontrándose en todos los casos errores medios relativos absolutos inferiores al 5%. Por otro lado, cabe destacar que en todos los casos las temperaturas medidas resultaron con un mayor retardo que las simuladas; este fenómeno fue también observado por Akterian (1995) quien concluyó que podría deberse a la gran diferencia entre la conductividad térmica (k) y el calor específico (cp) del termopar y las muestras. El "lag" característico que se observa al inicio del calentamiento demuestra la correcta ubicación de los termopares en las diferentes repeticiones.

En cada uno de los gráficos anteriores, se evidencia que los perfiles de temperatura simulados y reales difieren en el punto de inicio (tiempo=0), ya que la temperatura inicial de cada una de las muestras no era exactamente igual, existían diferencias $\pm 2^\circ\text{C}$, lo que influye en la comparación de las historias térmicas, no mostrando esto un efecto marcado, pues los errores medios relativos absolutos son menores del 5%.

Este tipo de simulaciones son cercanas a la realidad física y de tipo fenomenológico, en éstas no se realiza estimación de parámetros sino comparaciones de los datos simulados con los experimentales, encontrando el menor error relativo absoluto hallando así el coeficiente convectivo de transferencia de calor. Cabe resaltar que el coeficiente

convectivo de transferencia de calor (h) se ve afectado por diversos factores como la temperatura, la geometría del alimento, la composición del mismo, las propiedades fisicoquímicas del fluido calefactor y del alimento, del movimiento del fluido calefactor y de la existencia de burbujas en el medio de calefacción, siendo así el h un valor complejo de estimar, es por ello, que a una misma temperatura se pueden obtener coeficientes convectivos de transferencia de calor un poco diferentes, siendo el caso de la mora ya que es un sólido irregular complejo.

5. CONCLUSIONES

Empleando la técnica de simulación en COMSOL Multiphysics 3.5 versión evaluación (Método de elementos finitos (mapeo del sólido)), se determinaron de manera satisfactoria los coeficientes convectivos de transferencia de calor, para el proceso de escaldado de mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*) en agua como fluido de calefacción, a temperaturas de 70, 80 y 90°C.

Los valores del coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio para el proceso de escaldado de la mora, teniendo en cuenta la temperatura y la composición de ésta, a temperatura de 70°C fue de $504.5 \pm 41.9 \text{ W/m}^2\text{K}$, para 80°C fue de $382.5 \pm 56.9 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $567 \pm 122.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la temperatura de 90°C.

Los datos experimentales con respecto a los simulados no presentaron diferencias significativas, encontrándose los valores del porcentaje de error en el rango de 0.396% - 3.746%. Dichos porcentajes de error medio relativo absoluto obtenidos para cada perfil de temperatura simulado se encuentran por debajo del criterio ingenieril adoptado (5%).

6. RECOMENDACIONES

Se debe ubicar correctamente el termopar en el centro térmico del alimento, puesto que en los sistemas alimenticios reales se debe tener en cuenta la resistencia externa e interna del alimento a la transferencia de calor. La conducción de la partícula y por lo tanto la localización exacta del termopar es de gran importancia, por lo que la conductividad térmica de la partícula debe conocerse con exactitud.

Se deben mantener las temperaturas de escaldado en estudio lo más constante posibles en una oscilación de $\pm 0,5$ °C; y teniendo en cuenta que las muestras no presenten movimientos en el proceso de escaldado para evitar desviaciones significativas entre los datos recolectados.

Para alimentos de formas irregulares complejas, se debe seleccionar las muestras lo más homogénea posible en tamaño y forma, y con el mismo grado de madurez.

Se deben realizar los análisis para alimentos frescos, a lo sumo refrigerados, pero nunca congelados, ya que al descongelarse los alimentos pierden firmeza.

7. BIBLIOGRAFÍA

Akterian, S.1995. Numerical simulation of unsteady heat transfer in canned mushrooms in brine during sterilization process. *Journal of Food Engineering*, Vol 25. 45-53p.

Antia, G. Torres, J. 1998. El manejo post-cosecha de Mora (*Rubus glaucus Benth*). Serie de paquetes de capacitación sobre manejo post-cosecha de frutas y hortalizas; No. 12. Programa Nacional del SENA de capacitación en Manejo post-cosecha y comercialización de frutas y hortalizas, Convenio SENA – Reino Unido. Santafé de Bogotá, Colombia: Edición Magnitud Ltda. OP graficas; 1998. 272 p.

Astrom, A. Bark, G. 1994. Heat transfer between fluid and particles in aseptic processing. *Journal Food Engineering*. Vol. 21. 97-125p

Barret, D; Theerakulrait, C. 1995. Quality indicators in blanched, frozen, stored vegetables. *Food Tech*. Vol 49 n1. 62-65p.

Baucour, P. Cronin, K. Stynes, M. 2003. Process optimization strategies to diminish variability in the quality of discrete packaged foods during thermal processing. *Journal of Food Engineering*. Vol 60. 147–155p.

Bird, R. Steward, W. Lightfoot, E. 1960. Transport Phenomena. John Wiley y Sons, Inc. New York. 780p.

Castro, J. Cerdas, M. 2005. Mora (*Rubus spp*) Cultivo y Manejo Poscosecha. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Universidad de Costa Rica. Consejo Nacional de Producción. San José de Costa Rica.

Choi, Y. Okos, M. 1985. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods-Review . In Physical and Chemical properties of food. Ed. M. Okos. American Society of Agricultural Engineering, 93-101p.

Correa, L. 2002. Blackberry: A New Crop Option to Brazil. En Ciencia Rural, Santa María. vol 32, n1. 151-158p.

Estrada, F. 1998. Creación de software científico como herramienta educacional en Ingeniería Química. Cómputo en Educación. Congreso Cómputo 98 (40 Años de Cómputo en México). 11/1998. Ciudad de México.

Estrada, F. Cleland, D. Cleland, A. James, R. 2003 Simulation of transient behaviour in refrigeration plant pressure vessels: mathematical models and experimental validation. *International Journal of Refrigeration*. Vol 26. 170–179p

Fellows,P. 1988. Food Processing Thecnology. Principles and practices. Second Edition. Woodhead Publishing Limited. Inglaterra.

Fennema, O. 1993. Química de los alimentos. Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España. 1095p

Franco, G.; Giraldo, C. 1998. El cultivo de la mora. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, PRONATTA. 130p.

Gallardo, M. 2004. Validación experimental de un software asistido por internet para describir el proceso combinado escaldado-hidrogenofriamiento en floretes de brócoli (*Brassica oleracea* L. var *italica*). Tesis para optar por el título de Licenciado en Ingeniería en alimentos. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Ingeniería en Alimentos. Universidad Austral de Chile. 93p

Ganthavorn, C. Powers, J. 1988. Changes in peroxidase activity, hexanal, ascorbic acid and free sulfhydryl in blanched asparagus during frozen storage. *Journal Food Science*. Vol 53 n5. 1403-1405p

Geankoplis, C. 1986. Procesos de Transporte y operaciones Unitarias. Tercera Edición. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México. 759p

Giancoli, C. 2006. Física. Principios con aplicaciones. Sexta edición. Editorial Pearson Educación. México. 848p

Hermesom, A. Hulland, E. 1984. Conservas alimenticias. Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España. 451p.

Lespinard, A. Goñi, S. Mascheroni, R. 2007. Escaldado de hongos (*Agaricus bisporus*). Simulación por elementos finitos utilizando geometrías 2D axisimétrica y 3D, con y sin malla móvil. Revista Mecánica computacional. Vol 26: 3590- 3602p.

Lewis, M. 1990. Physical properties of foods and food processing system. Ellis HorwoodLímites. New York. 465p.

Luh, B. Kean, C. 1988. Canning of vegetables. In Commercial vegetables processing. Luh, B. S. and Woodroof, J. G (Eds). Van Nostrand Reinhold. New York. 342-386p

Madera, S; Tarrá, L. 2014. Determinación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en el proceso de escaldado de ahuyama (*Cucúrbita máxima*). Tesis para optar por el título de Ingeniero de Alimentos. Universidad de Córdoba. Facultad de Ingenierías. 84p.

Martínez, V. 2000. Simulación de Procesos en Ingeniería Química. Plaza y Valdés Editores. México.

Martins, R.C. 2006. Simple finite volumes and finite elements procedures for food quality and safety simulations. *Journal Food Engineering*. Vol 73. N° 4. 327–338p.

Mazo, J. Rodriguez, D. Echeverri, C. 1998. El cultivo de la mora (*Rubus glaucus Benth*): Principios agroecológicos para su manejo. Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA. Antioquia. Colombia.

Mendoza, R. Herrera, A. 2012. Cinética de inactivación de la enzima peroxidasa, color y textura en papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo *phureja*) sometida a tres condiciones de escaldado. Revista Información Tecnológica. vol 23 n 4. 73-82p

Olsson, E.; Janestad, H.; Ahrné, L.; Trägårdh, A. y Singh, R. 2008. Determination of local heat-transfer coefficients around a circular cylinder under an impinging air jet. Int. J. Food Prop. 11(3), 600–612p.

Ordoñez, J. Morales, E. 1996. Determinación y evaluación del coeficiente convectivo de transferencia de calor en procesos continuos de escaldado e hidrogenfriado. Tesis para optar por el título de Licenciado en Ingeniería de Alimentos. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. 154 p.

Ortega, F. Lopez, E. Sierra, M. Hoyos, D. 2011. Modelación y simulación del escaldado de zanahoria por elementos finitos utilizando geometría 3D. Memorias 2do. Simposio internacional y 3ro. Nacional agroalimentario. Montería. 1-6p.

Pinho, C. y Cristianin, I. M. 2006. Método de otimização para determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor em alimentos esterilizados em embalagem de vidro. Braz. J. Food Technol. Vol 9 n3. 157– 163p.

Pornchaloempong, p; Balaban, M.; Teixeira, A. y Chau, k, 2003. Numerical simulation of conduction heating in conically shaped bodies. *J. Food Process Engineering*. Vol 25. 539–550p.

Poulsen, K. 1986. Optimization of vegetables blanching. *Food tech*. Vol 6. 122-129p.

Rees, J. Bettison, J. 1993. Enlatado. En: Manual de industria de los alimentos. Ranken, M.D. (ed). Editorial Acribia S.A. Zaragoza. España. 242-292p

Rennie. T.2009. Berry Fruit- Value Added Products for Health Promotion. *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 20. 103-109p.

Rodriguez, C. 2005. Simulación computacional de procesos de conducción de calor en alimentos de formas irregulares complejas. Tesis para optar por el título de Licenciado en Ingeniería en Alimentos. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Ingeniería en Alimentos. Universidad Austral de Chile. 226p

Sablani, S. S. 2009. Measurement of Surface Heat Transfer Coefficient, In *Handbook of Food Properties*. Second edition M. S. Rahman (Editor). Francis and Taylor Group. 697-716p.

Scenna, N. 1999. Introducción a los métodos informáticos aplicados al modelado en Ingeniería. Modelado, Simulación y optimización de Procesos Químicos. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. Argentina.

Seeram, N. 2006. Nutritional Oncology (Second Edition). Berrys cap 37. Elsevier Inc. 2006. 615-628p.

Sweat, V. E. 1985. Thermal conductivity of foods: Present state of the data. ASHRAE Trans. 91: 299-311p.

Szajdek, A. Borowska, E. 2008. Bioactive Compounds and Health-Promoting Properties of Berry Fruits: A Review. Plant Foods Hum Nutr. 63:147–156p.

Tabla de composición de alimentos. 2005. Mora de Castilla. Instituto Colombiano de Bienestar Familiar. ICBF. Disponible en :
http://alimentoscolombianos.icbf.gov.co/alimentos_colombianos/principal_alimento.asp?id_alimento=419&enviado3=1 (Visitado: Agosto 12 de 2014)

Torres, R.; Grau, J. 2007. Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics. Addlink Media. Barcelona. España. 8-9p.

Villarroel, V. 2010. Evaluación nutritiva y nutracéutica de la mora de castilla (*Rubus glaucus*) deshidratada a tres potencias por el método de microondas. Tesis para optar por el título de Bioquímico Farmacéutico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de Bioquímica y Farmacia. Riobamba-Ecuador. 5, 53, 72. 19p.

Zuritz, C.; McCoy, S.; Sastry, S. 1990. Convective heat coefficients of irregular particles immersed in non – Newtonian fluids during tube flow. Journal Of Food Engineering. Vol. 11. 159 – 174p.

8. ANEXOS

Anexo A: Mora de castilla seleccionada para la realización del proyecto.

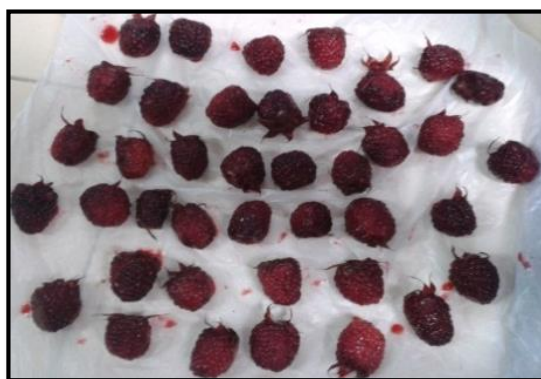


Figura 4. Materia prima utilizada. Fuente: autor.

Anexo B: Escaldado de mora de castilla.



Figura 5. Inmersión de la muestra en la freidora-escaldadora. Fuente: autor.

Anexo C: Montaje utilizado para la obtención de los datos.



Figura 6. Montaje de escaldado de moras. Fuente: autor.

Anexo D: Ingreso de las coordenadas x, y para cada una de las dimensiones de la mora.

	x	y	weight
1:	0	0	1
2:	0	0.019	1
3:			
4:			

Name: B1

Figura 7: Ingreso de las coordenadas x, y para el largo L de la mora.

	x	y	weight
1:	0	0.019	1
2:	0.0054	0.019	1
3:			
4:			

Name: B3

Figura 8: Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 1 de la mora.

Object Properties

Points Curves

Curve selection:

1

Delete

Curve properties

	x	y	weight
1:	0	0	1
2:	0.0050	0	1
3:			
4:			

Preview

Name: B2

OK Cancel Apply Help

Figura 9: Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 3 de la mora.

Object Properties

Points Curves

Curve selection:

1

Delete

Curve properties

	x	y	weight
1:	0.0050	0	1
2:	0.00745	0.0029	1
3:			
4:			

Preview

Name: B4

OK Cancel Apply Help

Figura 10: Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 4 de la mora.

Object Properties

Points Curves

Curve selection:

1

Delete

Curve properties

	x	y	weight
1:	0.00745	0.0029	1
2:	0.0081	0.016	1
3:			
4:			

Preview

Name: B6

OK Cancel Apply Help

Figura 11: Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 5 de la mora.

Object Properties

Points Curves

Curve selection:

Curve properties

	x	y	weight
1:	0.0054	0.019	1
2:	0.0081	0.016	1
3:			
4:			

Delete Preview

Name: B5

OK Cancel Apply Help

Figura 12: Ingreso de las coordenadas x, y para la dimensión 6 de la mora.

Anexo E: Mediciones de las moras utilizadas para cada análisis a las diferentes temperaturas.

Tabla 5: Mediciones de las moras para la temperatura de 70°C

	Mediciones (cm)							
	PS	PI	1	L	3	4	5	6
M1	1,62	1,5	0,54	1,9	0,5	0,38	0,95	0,3
M2	1,74	1,4	0,58	1,88	0,48	0,38	0,94	0,3
M3	2,06	1,7	0,69	2,01	0,56	0,4	1,01	0,4
M4	1,76	1,6	0,59	2	0,53	0,4	1	0,4

Tabla 6: Mediciones de las moras para la temperatura de 80°C

	Mediciones (cm)							
	PS	PI	1	L	3	4	5	6
M1	1,71	1,4	0,57	1,91	0,45	0,38	0,96	0,3
M2	1,62	1,6	0,54	1,88	0,52	0,38	0,94	0,3
M3	1,61	1,5	0,537	1,92	0,5	0,38	0,96	0,3
M4	1,7	1,5	0,567	1,93	0,49	0,39	0,97	0,3

Tabla 7: Mediciones de las moras para la temperatura de 90°C

	Mediciones (cm)							
	PS	PI	1	L	3	4	5	6
M1	1,84	1,42	0,61	2,03	0,47	0,41	1,02	0,368
M2	1,77	1,5	0,59	1,87	0,5	0,37	0,94	0,354
M3	1,95	1,52	0,65	2,09	0,51	0,42	1,05	0,39
M4	1,85	1,48	0,62	2,06	0,49	0,41	1,03	0,37

Dónde:

M1: Muestra 1; M2: Muestra 2; M3: Muestra 3; M4: Muestra 4; PS: Parte superior de la mora.; PI: Parte inferior de la mora; L: Largo de la mora.

Las medidas PS, PI, L, 1, 3, 4 y 5, se referenciaron en la Figura 1.

Anexo F: Estructura geométrica en dos dimensiones de la mora.

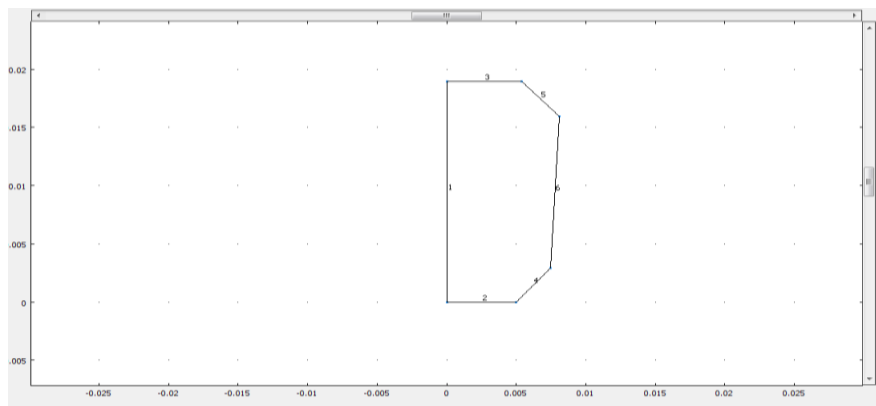


Figura 13: Mitad del corte transversal de la mora.

Anexo G: Generación del sólido forzado de la mora en 2D.

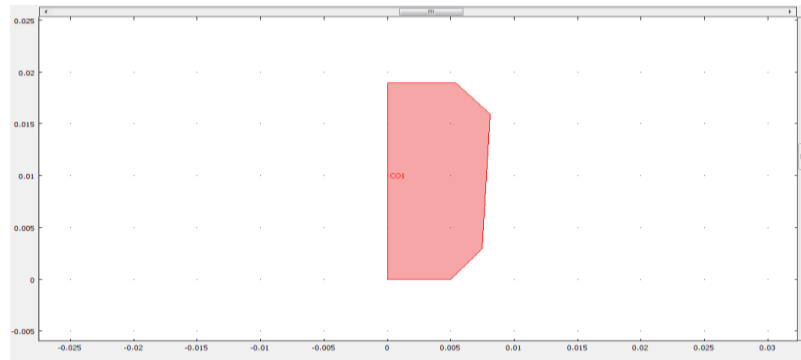


Figura 14: Sólido forzado

Anexo H: Formación del sólido y geométrica de la mora en 3D

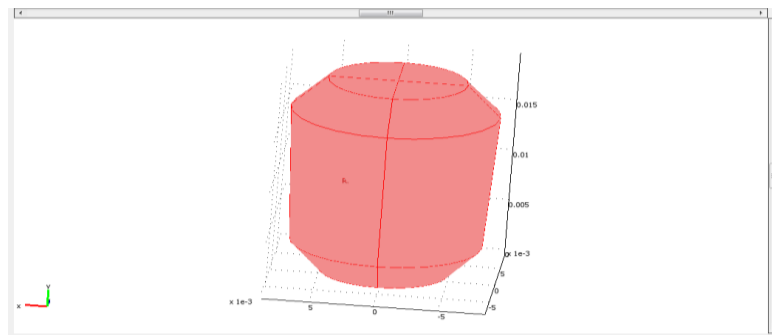


Figura 15: Configuración geométrica de la mora en 3D

Anexo I: Digitación de las propiedades termofísicas de la mora.

The screenshot shows the 'Subdomain Settings - Heat Transfer by Conduction (ht)' dialog box. The 'Equation' section displays the heat conduction equation: $\partial_{ts} \rho C_p \partial T / \partial t - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q$, where T is temperature. The 'Physics' tab is selected, showing 'Thermal properties and heat sources/sinks'. The 'Library material' dropdown is set to '1'. The 'Quantity' table lists the following properties:

Quantity	Value/Expression	Unit	Description
∂_{ts}	1		Time-scaling coefficient
k (isotropic)	0.6041	W/(m·K)	Thermal conductivity
k (anisotropic)	400 0 0 0 400 0 0 0 4	W/(m·K)	Thermal conductivity
ρ	1046.14	kg/m³	Density
C_p	3784.73	J/(kg·K)	Heat capacity at constant pressure
Q	0	W/m³	Heat source

The 'Active in this domain' checkbox is checked. The 'OK', 'Cancel', 'Apply', and 'Help' buttons are at the bottom.

Figura 16: Ingreso de las propiedades termofísicas de la mora.

Anexo J: Digitación de la temperatura inicial o tiempo cero.

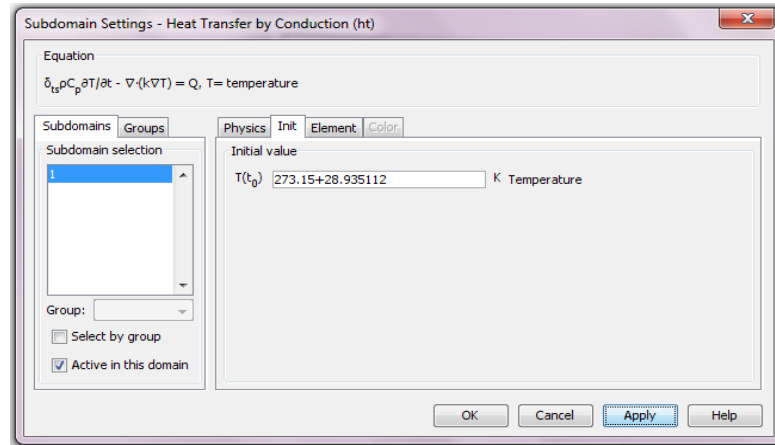


Figura 17: Ingreso de temperatura inicial o en el tiempo 0 de la mora.

Anexo K: Simulación con un h supuesto a condiciones de escaldado.

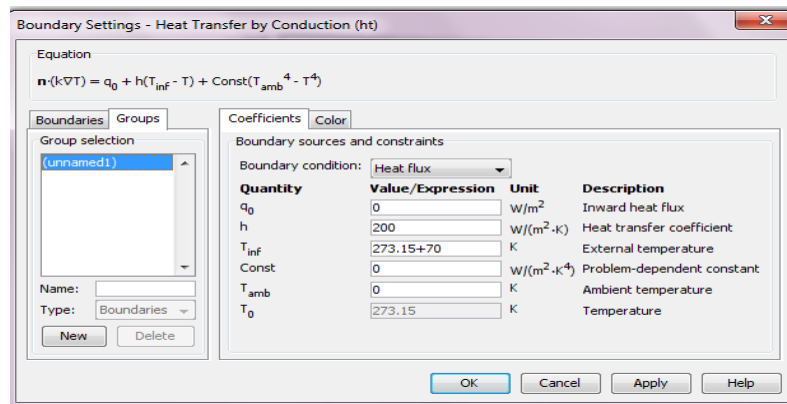


Figura 18: Ingreso del “ h ” supuesto y la temperatura de escaldado.

Anexo L: Generación de la malla para la mora en 3D.

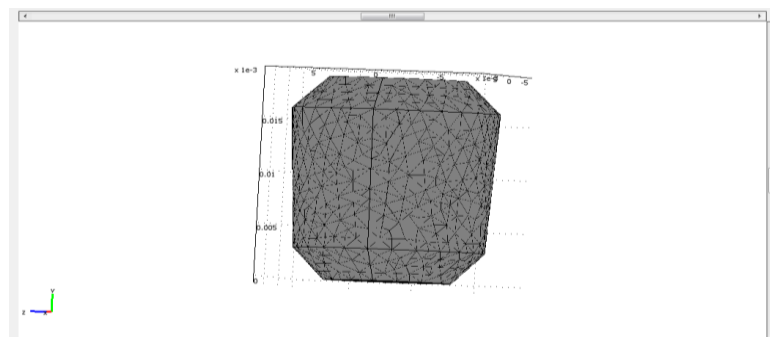


Figura 19: Mallado de la configuración geométrica en 3D de la mora.

Anexo M: Digitación de las condiciones de contorno (tiempo del escaldado).

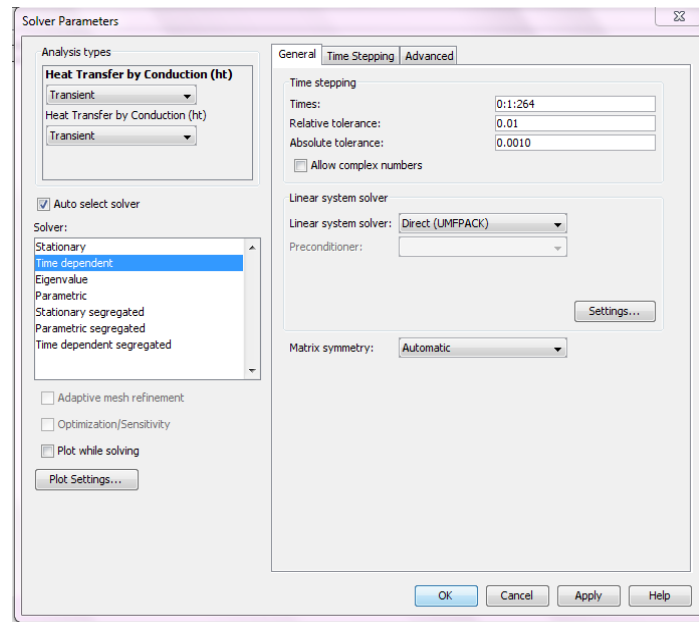


Figura 20: Ingreso de las condiciones de tiempo.

Anexo N: Simulación del proceso de calentamiento de la mora.

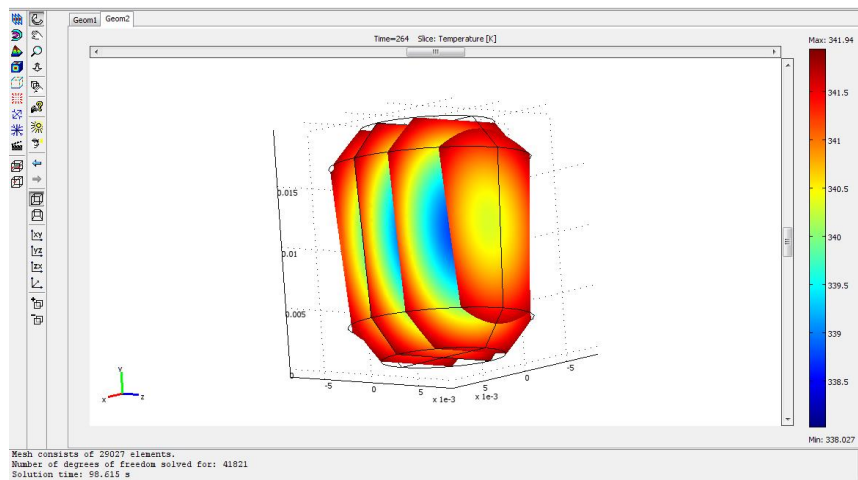


Figura 21: Calentamiento simulado de la mora.

Anexo O: Digitación del centro térmico de la mora.

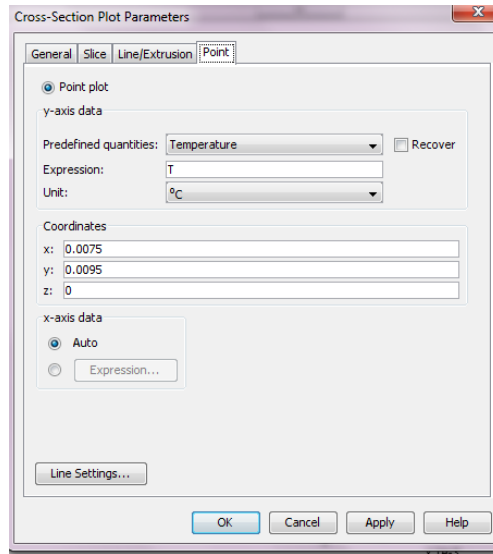


Figura 22: Ingreso de los datos del centro térmico de la mora.

Anexo P: Perfil de temperatura simulado para un h supuesto condiciones determinadas.

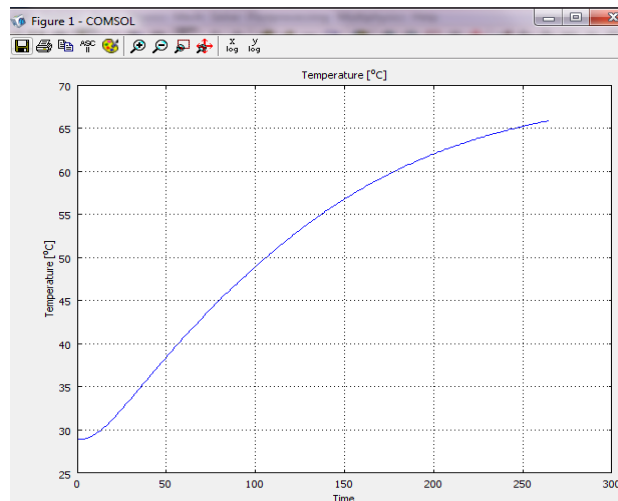


Figura 23: Perfil de temperatura para un ' h ' supuesto y una temperatura determinada.

Anexo Q: Datos del % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 1.

Tabla 8. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 1

h (W/m ² K)	% Error
300	4,454904326
400	2,742062036
500	1,239279521
549	0,99738501
550	0,997239568
551	1,02570697
552	1,02630637
553	0,998313319
554	1,027952393
555	1,028838259
556	1,000615202
557	1,001825587
600	1,196466482
700	1,81128934
800	1,652664284
900	2,024149525
1100	3,026815546

Anexo R: Gráfico que expone los residuales para la muestra 1 a 70°C.

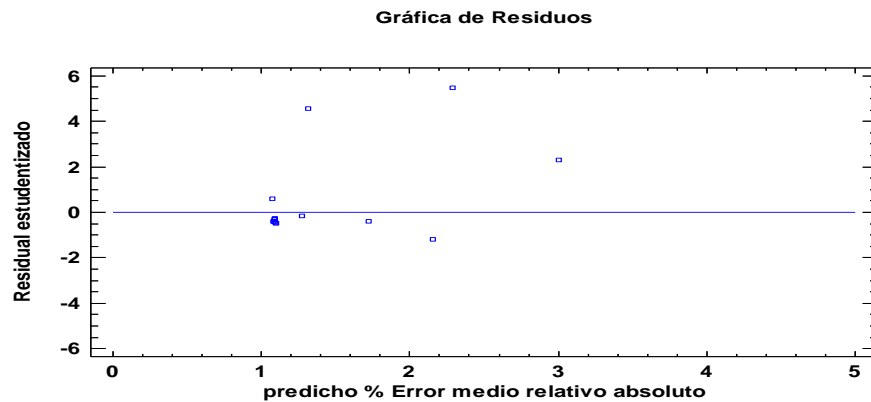


Figura 24: Distribución de residuales para la muestra 1 a 70°C.

Anexo S: Datos del % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 2

Tabla 9. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 2

h (W/m ² K)	% Error
300	4,70096006
400	3,32392348
410	3,26398466
420	3,21427414
430	3,17154498
440	3,13585319
450	3,0953119
460	3,09339306
470	3,07089985
471	3,08734263
472	3,08725054
473	3,07054129
474	3,08777737
475	3,07079503
476	3,08857289
477	3,08917477
478	3,07198533
479	3,07249576
480	3,07307767
485	3,09655768
490	3,08456189
500	3,10540922
550	3,3511749
600	3,65032119
700	4,35929635

Anexo T: Gráfico que expone los residuales para la muestra 2 a 70°C

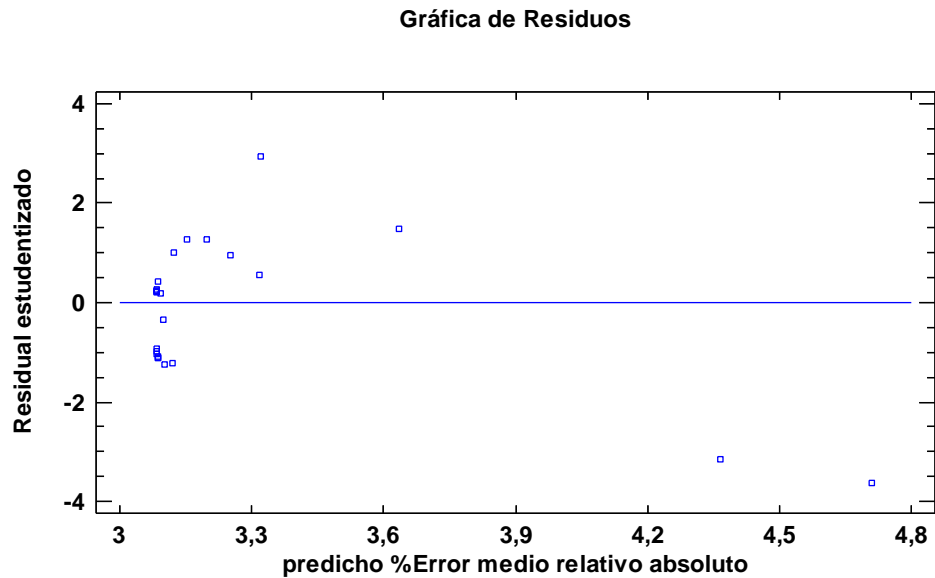


Figura 25: Distribución de residuales para la muestra 2 a 70°C.

Anexo U: Datos del % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 3

Tabla 10. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 3

h (W/m ² K)	% Error
300	5,45589341
400	3,52906137
450	3,02585944
460	2,95881759
470	2,88610437
480	2,83946422
490	2,78243471
500	2,75023463
510	2,70091411
520	2,68261375
525	2,65670949

527	2,65233686
530	2,64645597
531	3,10657944
532	3,01353229
535	3,09315552
540	2,98941132
550	3,20744082

Anexo V: Gráfico que expone los residuales para la muestra 3 a 70°C

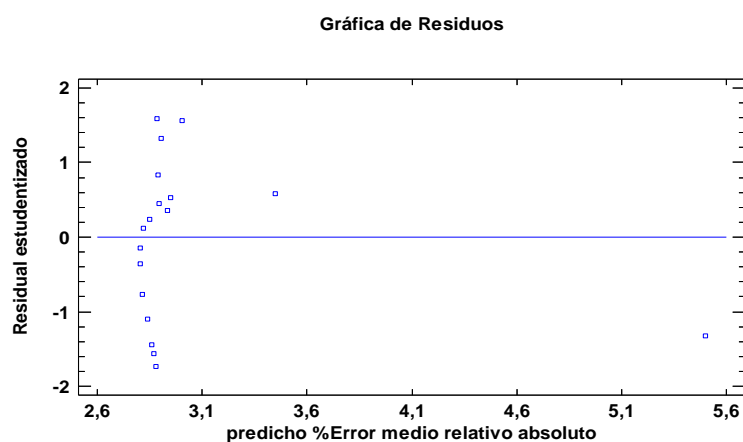


Figura 26: Distribución de residuales para la muestra 3 a 70°C.

Anexo W: Datos del % Error para los h simulados a 70 °C, muestra 4.

Tabla 11. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 70 °C, muestra 4

h (W/m ² K)	% Error
300	4,54452032
400	3,56673837
450	3,44581261
465	3,43658777
480	3,45870041
490	3,47749067

510	3,52735156
600	4,10621784
700	4,53900889
800	4,97792165

Anexo X: Gráfico que expone los residuales para la muestra 4 a 70°C

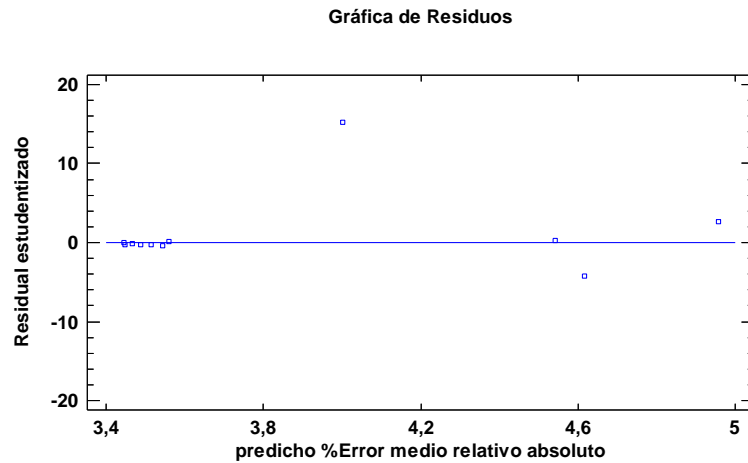


Figura 27: Distribución de residuales para la muestra 4 a 70°C.

Anexo Y: Datos del % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 1.

Tabla 12. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 1.

h (W/m ² K)	% Error
300	2,25994424
350	2,19775954
400	1,75365628
420	1,70913642
425	1,5226009
429	1,5210705
430	1,52125292
440	1,56365407
450	1,68058926

460	1,8411504
-----	-----------

Anexo Z: Gráfico que expone los residuales para la muestra 1 a 80°C

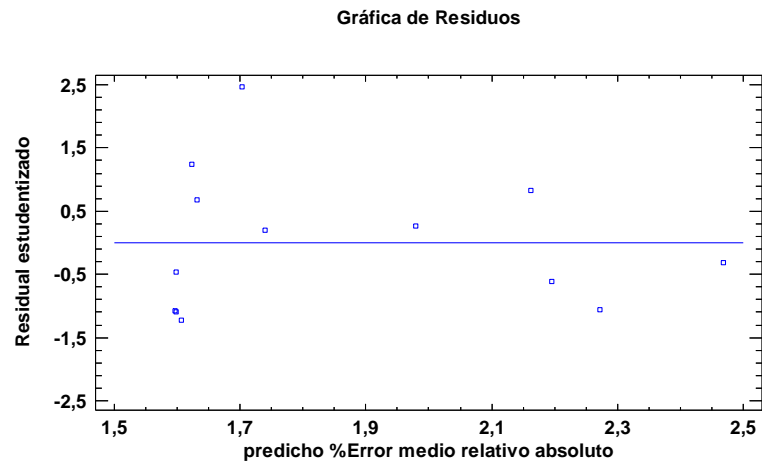


Figura 28: Distribución de residuales para la muestra 1 a 80°C.

Anexo AA: Datos del % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 2.

Tabla 13. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 2

h (W/m ² K)	% Error
200	5,88688941
300	2,70200636
380	1,20360969
390	1,10803311
406	1,02306045
408	1,02252509
409	1,02339509
420	1,06795622
450	1,47721617
480	1,98376278

Anexo AB: Gráfico que expone los residuales para la muestra 2 a 80°C.

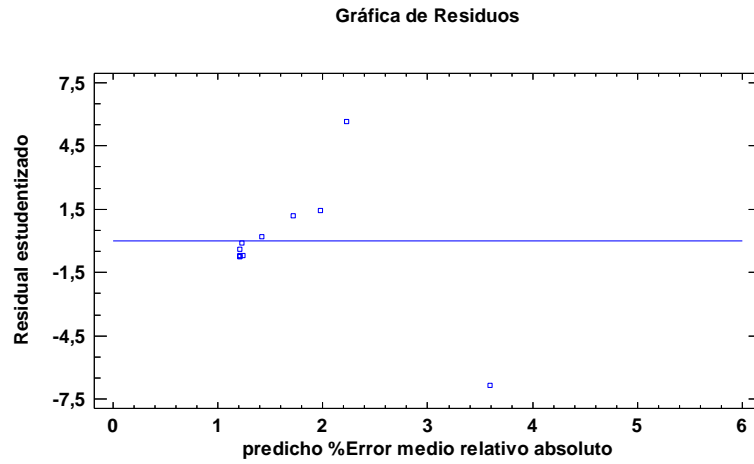


Figura 29: Distribución de residuales para la muestra 2 a 80°C.

Anexo AC: Datos del % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 3.

Tabla 14. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 3.

h (W/m² K)	% Error
200	4,65965199
290	0,57334683
299	0,45042901
300	0,44303749
301	1,17883023
303	1,13894171
310	1,00889414
330	0,76327271
350	0,74930464
380	1,08142534
400	1,47106638
500	3,21015146

Anexo AD: Gráfico que expone los residuales para la muestra 3 a 80°C

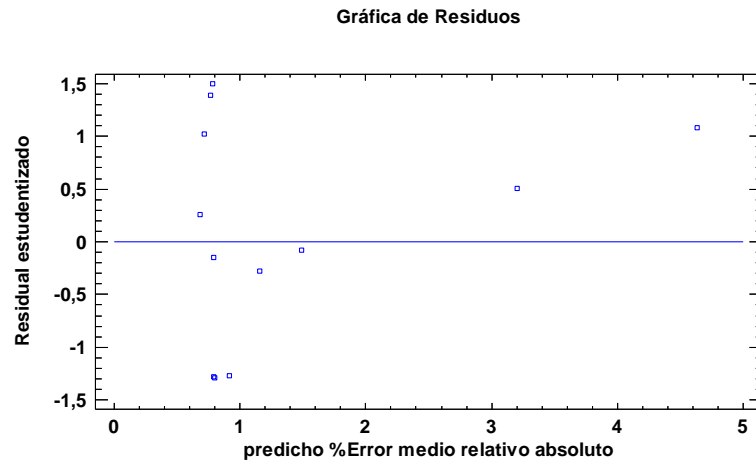


Figura 30: Distribución de residuales para la muestra 3 a 80°C.

Anexo AE: Datos del % Error para los h simulados a 80 °C, muestra 4.

Tabla 15. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 80 °C, muestra 4.

h (W/m ² K)	% Error
300	0,55031229
320	0,48180906
350	0,41760346
380	0,39684205
390	0,39584147
393	0,39574288
394	0,39586716
400	0,39665809
450	0,45498662
470	0,50300604
500	0,59921678
600	0,93096054

Anexo AF: Gráfico que expone los residuales para la muestra 4 a 80°C

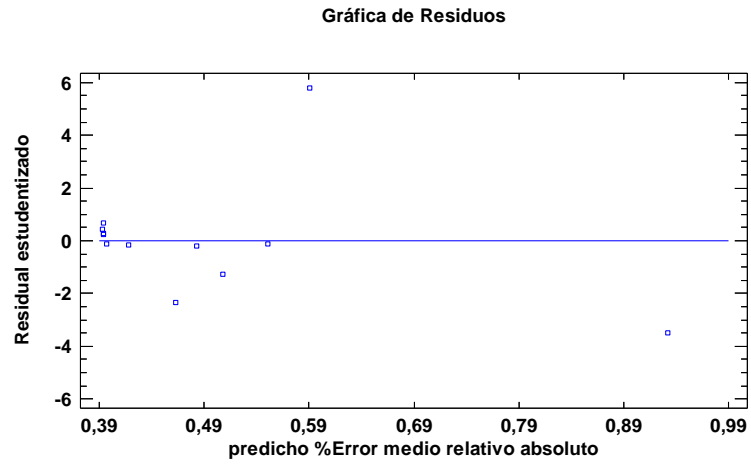


Figura 31: Distribución de residuales para la muestra 4 a 80°C.

Anexo AG: Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 1.

Tabla 16. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 1.

h (W/m ² K)	% Error
300	6,1401283
400	4,00345614
500	2,23970985
550	1,67939294
600	1,29936047
640	1,18121259
643	1,17771703
646	1,17523013
647	1,17493692
648	1,17513093
670	1,25428456
700	1,4249078
800	2,06235948

Anexo AH: Gráfico que expone los residuales para la muestra 1 a 90°C

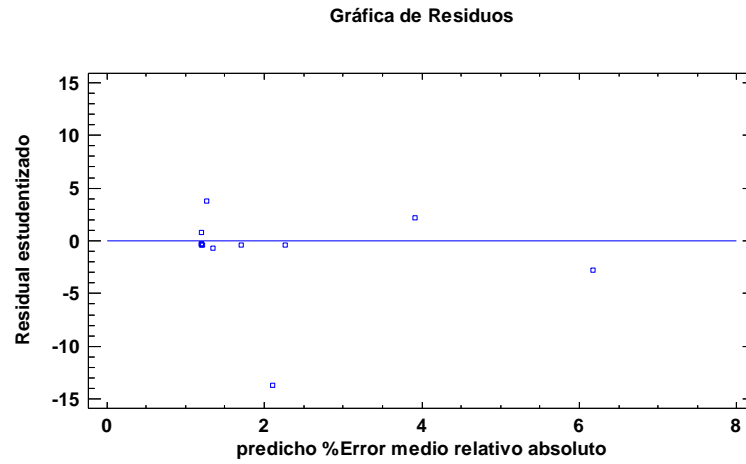


Figura 32: Distribución de residuales para la muestra 1 a 90°C.

Anexo AI: Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 2.

Tabla 17. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 2

h (W/m ² K)	% Error
200	8,79288477
300	3,36479028
440	1,3396562
450	1,32406149
468	1,27054684
469	1,20804841
470	1,20824297
480	1,32560689
500	1,34331961
550	2,08689124
600	2,80271653
700	3,84695691

Anexo AJ: Gráfico que expone los residuales para la muestra 2 a 90°C.

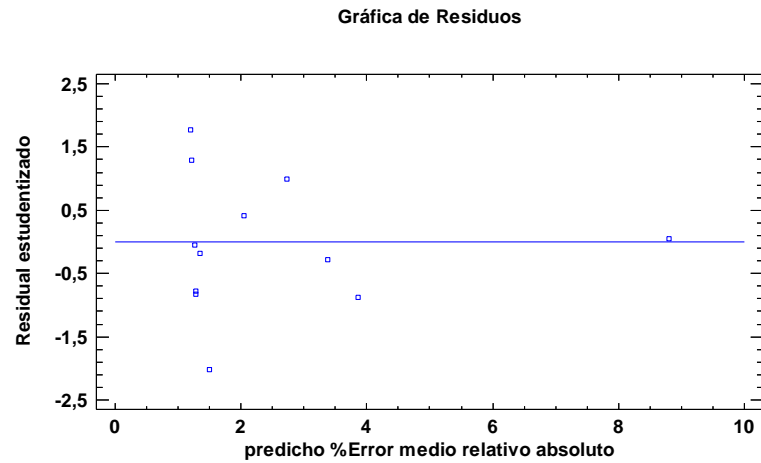


Figura 33: Distribución de residuales para la muestra 2 a 90°C.

Anexo AK: Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 3

Tabla 18. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 3

h (W/m ² K)	% Error
200	12,1481223
300	6,91719247
400	5,10725511
500	3,70615182
600	2,9331307
650	2,78726348
690	2,74751302
695	2,74655898
696	2,74653637
697	2,7465498
710	2,74945557
800	2,90032291
900	3,23340057
1000	3,54842312

Anexo AL: Gráfico que expone los residuales para la muestra 3 a 90°C.

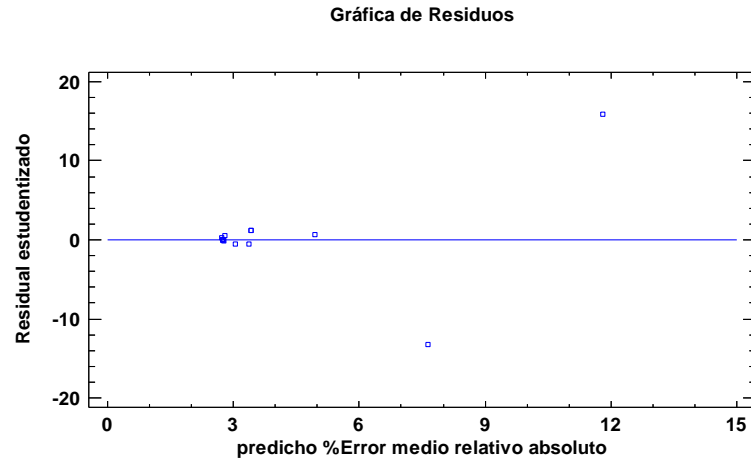


Figura 34: Distribución de residuales para la muestra 3 a 90°C.

Anexo AM: Datos del % Error para los h simulados a 90 °C, muestra 4.

Tabla 19. Error medio relativo absoluto para los h simulados a 90 °C, muestra 4.

h (W/m ² K)	% Error
300	4,839644795
400	3,983819705
440	3,793064292
455	3,745743935
456	3,74560649
457	3,745659098
460	3,746362302
470	3,755310923
480	3,772831731
500	3,831039195
550	4,082787774
600	4,234624684

Anexo AN: Gráfico que expone los residuales para la muestra 4 a 90°C

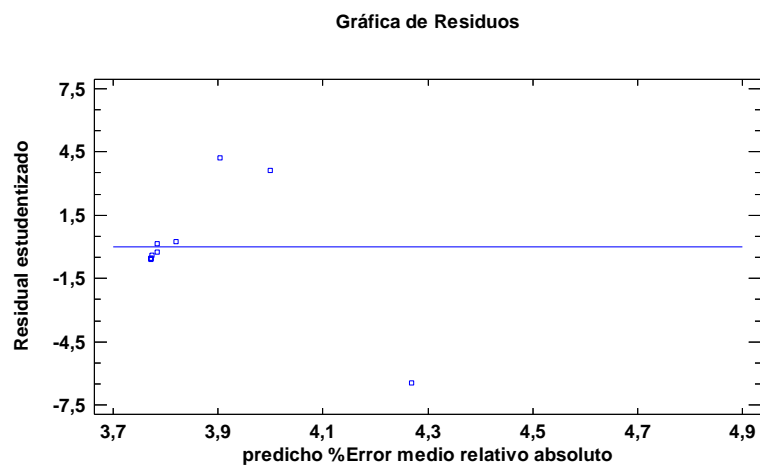


Figura 35: Distribución de residuales para la muestra 4 a 90°C.